

# 高浜発電所 3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について (概要版)

2020年10月2日



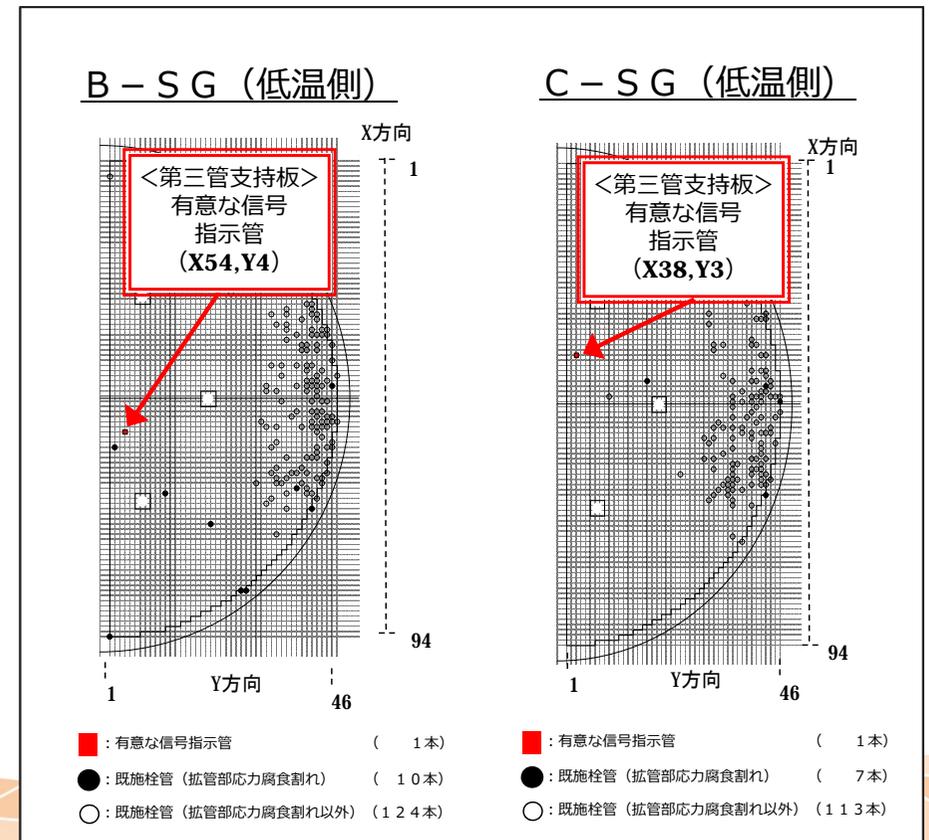
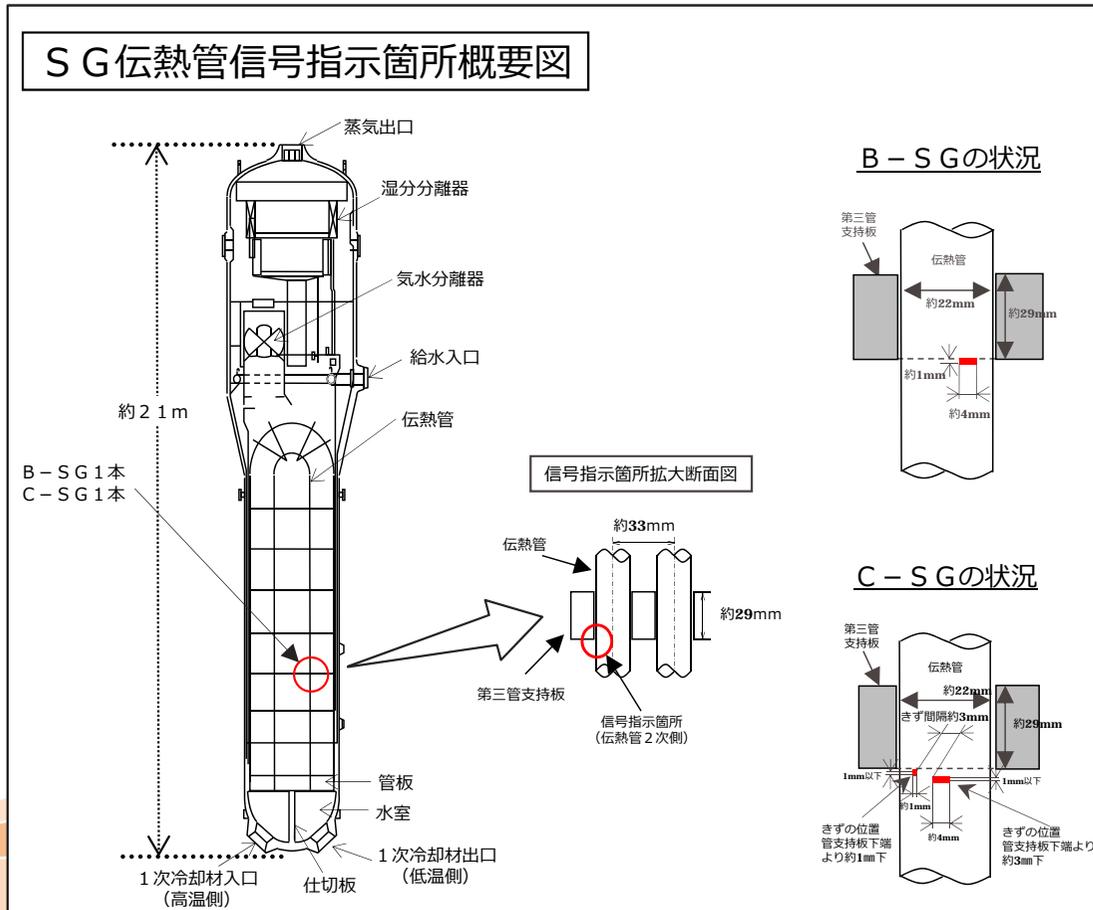
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

説明項目		ページ番号
1	事象の概要	3
2	原因調査	5
3	減肉メカニズム	2 2
4	異物流入に関する調査	4 1
5	推定原因	5 1
6	対策	5 2

# 1. 事象の概要

2020年1月6日からの第24回定期検査において、3台ある蒸気発生器（以下、「SG」という。）の伝熱管の健全性を確認するため渦流探傷試験（以下、「EC実」という。）を実施した。

その結果、B-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管1本の伝熱管2本について、管支持板部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示を確認したことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条ならびに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、2月18日13時00分に判断した。



# 1. 事象の概要 (減肉伝熱管 2次側からの確認結果)

E C Tで有意な信号指示を確認した伝熱管を、2次側から小型カメラにて点検した結果、摩耗減肉痕とみられる箇所を確認した。

なお、E C Tの信号指示による位置およびサイズと相違はなかった。

## ○ B - S G

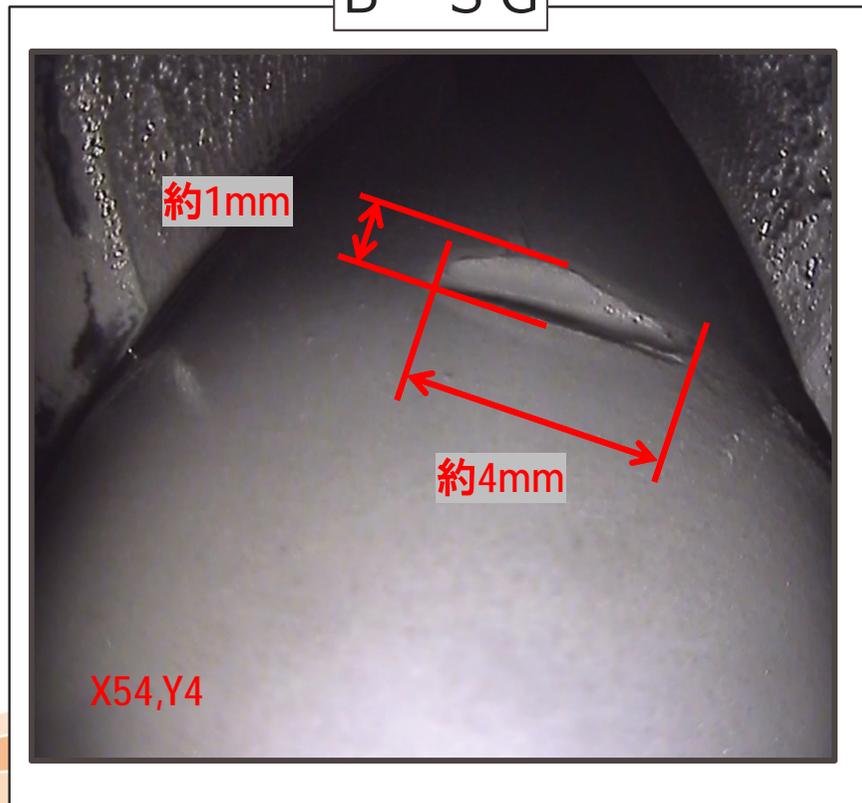
低温側第三管支持板：長さ 約 4 mm、幅 約 1 mm (X54,Y4) 減肉率：約 3 2 %

## ○ C - S G

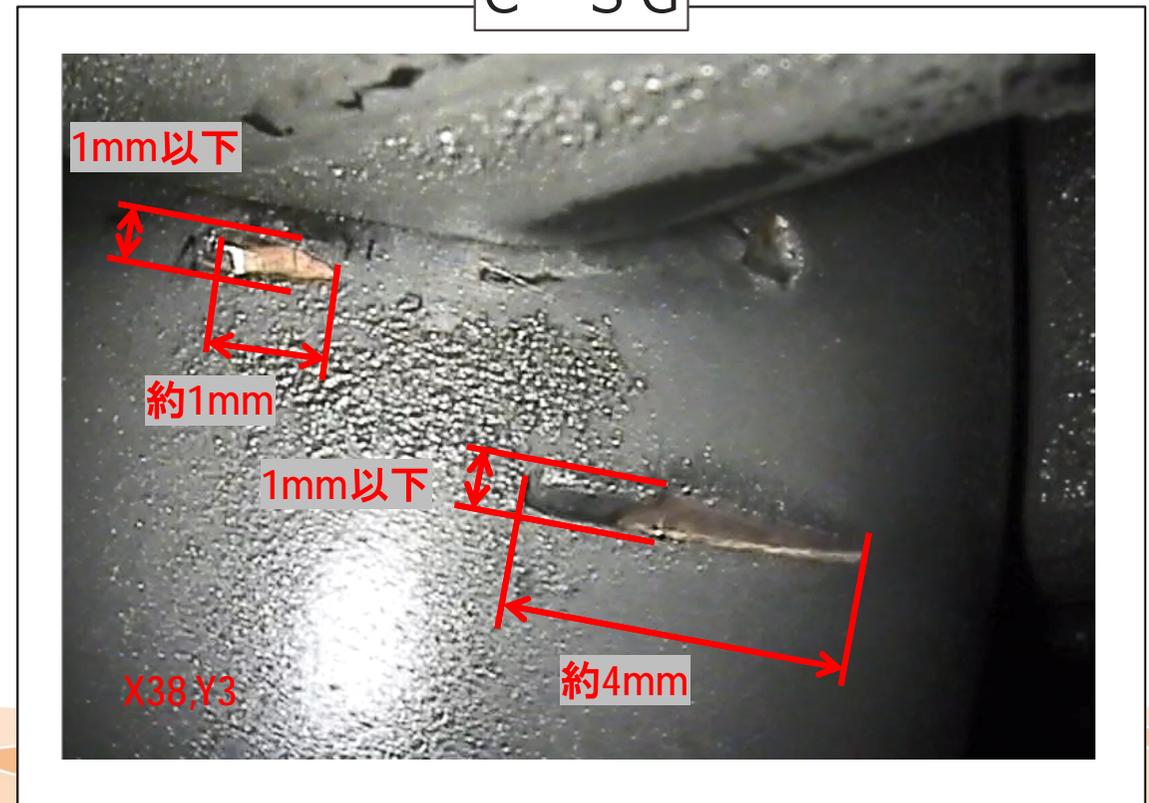
低温側第三管支持板：長さ 約 1 mm、幅 1 mm以下 (X38,Y3) 減肉率：約 2 8 %

低温側第三管支持板：長さ 約 4 mm、幅 1 mm以下 (X38,Y3) 減肉率：約 5 6 %

B - S G



C - S G



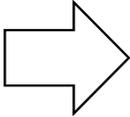
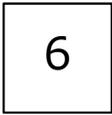
## 2. 原因調査（要因分析に基づく調査）

有意な信号指示を確認した伝熱管の外面減肉の原因を調査するため、要因分析に基づき調査を実施した。

### ○ S G 伝熱管内面（1次側）からの損傷

E C T の信号指示を確認した結果、伝熱管内面（1次側）にきずがないことを確認した。

### ○ S G 伝熱管外面（2次側）からの損傷

- 粒界腐食割れ、ピitting、リン酸減肉発生の可能性について確認した結果、3号機では良好な水質が維持されており、発生の可能性はない。また、カメラによる外観観察結果からも、これらの損傷ではないことを確認した。
- 管支持板との接触による摩耗減肉は、管支持板と減肉位置を考慮すると、管支持板との接触、摩耗によって発生した減肉ではない。
- E C T の信号指示を確認した結果、デンティングではない。
- 管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ非常に小さく、流体振動による疲労損傷は発生しない。
- 当該部流速は約 3 m / s であり、かつ、T T 6 0 0 合金は耐エロージョン性が高いことから、エロージョンの発生はない。
- 異物（S G 器内、S G 器外）による損傷の可能性  

### ○ 損傷以外の E C T 信号指示

局所的なスケールの剥離は、減肉と識別できることから、今回の信号はスケールの剥離ではない。

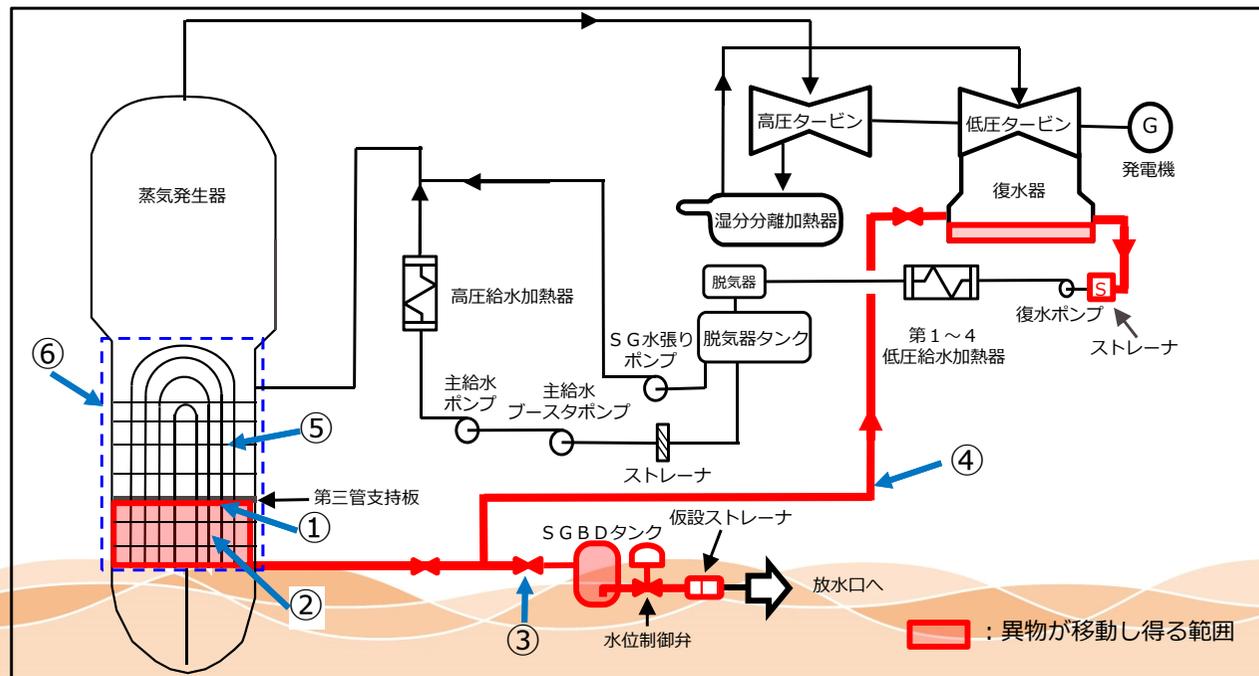
## 2. 原因調査（異物点検フロー）

### <異物が移動し得る範囲の検討>

- プラント運転中、外面減肉を発生させた異物は、上昇流により第三管支持板下面に張り付いた状態であり、プラント停止時に落下し、器内に残留または水抜き操作等によりSGブローダウン（以下、「BD」という。）システムを経て系外へ移動
- したがって、**異物が移動し得る範囲は、当該減肉箇所（第三管支持板下面）から下方の器内とSGBDシステムと特定**

### <異物点検の方針>

- まず、**異物が移動し得る範囲**のうち、当該箇所である①に加え、異物が留まり得る箇所である右点検フロー②③を優先して点検
- 次に、**異物が移動し得る範囲**のうち、異物が留まる可能性は低いが流路となっている右点検フロー④を確認
- 異物が残留していないことの確認として**右点検フロー⑤を確認
- 器内全体の再確認のため**更なる調査として**右点検フロー⑥を実施



### 【点検フロー】

#### ① 第三管支持板下面の減肉伝熱管周辺

↓ 減肉指示を確認した伝熱管周辺部（第三管支持板の下面）を小型カメラで目視点検

#### ② 異物が落下する可能性のある範囲

↓ 管板、流量分配板、第一から第二管支持板の上面の全ての範囲を小型カメラで目視点検

#### ③ SGBDシステムのうち異物滞留箇所

↓ SGBDシステムのうち異物が滞留しやすい構造となっている制御弁等を開放点検

#### ④ SGBDシステムの配管

↓ 異物が滞留する可能性は低いものの、配管内を小型カメラで目視点検

#### ⑤ 第三から第七管支持板上面

↓ 異物がないことを確認するため、第三管支持板から第七管支持板上面を小型カメラで目視点検

#### ⑥ N<sub>2</sub>バブリング

更なる調査として、SG器内の底部からN<sub>2</sub>を噴射させ、その後水を抜き管板上を点検

## <SG器内における異物点検内容>

- **異物が移動し得る範囲**のうち、当該箇所である①第三管支持板下面の減肉伝熱管周辺を点検
- **異物が留まり得る箇所**である②異物が落下する可能性のある範囲を点検
- **異物が残留していないことの確認として**⑤第三から第七管支持板上面を確認
- 器内全体の再確認のため**更なる調査として**右点検フロー⑥N<sub>2</sub>バブリングを実施

## 【点検フロー】

①第三管支持板下面の減肉伝熱管周辺

↓ 減肉指示を確認した伝熱管周辺部（第三管支持板の下面）を小型カメラで目視点検

②異物が落下する可能性のある範囲

↓ 管板、流量分配板、第一から第二管支持板の上面の全ての範囲を小型カメラで目視点検

③SGBD系統のうち異物滞留箇所

↓ SGBD系統のうち異物が滞留しやすい構造となっている制御弁等を開放点検

④SGBD系統の配管

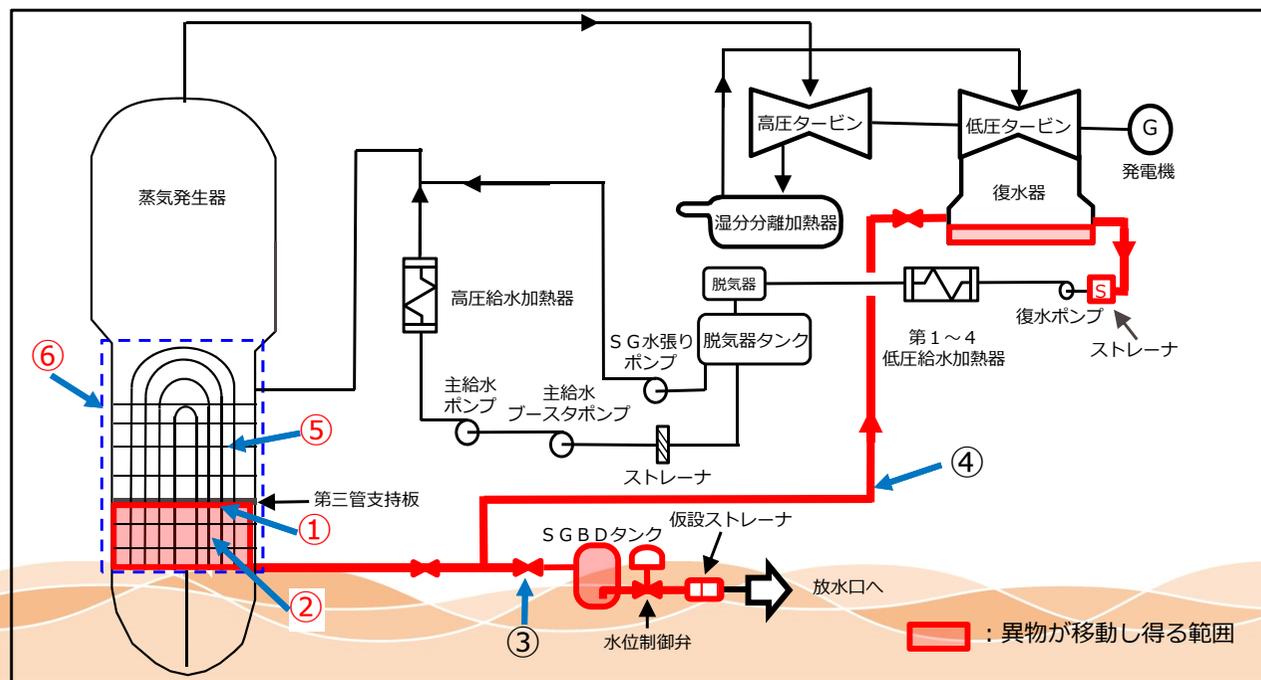
↓ 異物が滞留する可能性は低いものの、配管内を小型カメラで目視点検

⑤第三から第七管支持板上面

↓ 異物がないことを確認するため、第三管支持板から第七管支持板上面を小型カメラで目視点検

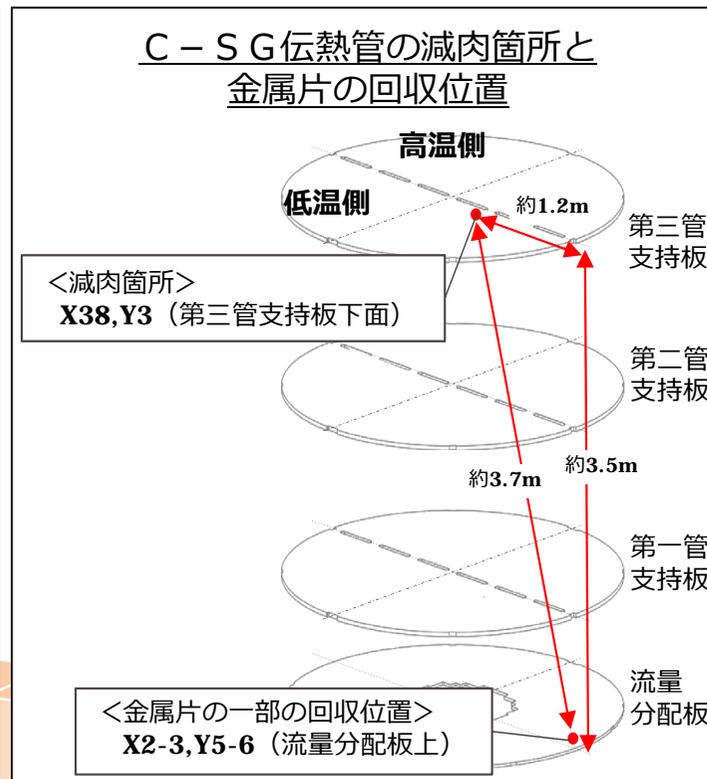
⑥N<sub>2</sub>バブリング

更なる調査として、SG器内の底部からN<sub>2</sub>を噴射させ、その後水を抜き管板上を点検



S G器内の管板、流量分配板、第一および第二管支持板の上面の全ての範囲ならびに第三管支持板の下面の減肉指示を確認した伝熱管周辺部についてカメラによる目視点検を実施した。

- 伝熱管から剥離したスケール（以下、スラッジという。）をS G器内の各所で確認した。
- A-S Gの流量分配板上（X54-55,Y44）にて金属片を確認した。
- C-S Gの流量分配板上（X2-3,Y5-6）にて金属片を確認した。  
 なお、C-S Gの金属片を確認した位置は、減肉を確認した位置から約3.5m下方、約1.2m半径方向に離れた場所であった。
- B-S G器内にはスラッジ以外に異物はなかった。



- 4号機前回 (22回) 定期検査で確認した金属片の写真と、3号機今回 (24回) 定期検査でのスラッジ写真を示す。
- スラッジか否かの判断は、形状 (厚み、R形状など) および金属光沢により実施しており、スラッジであれば伝熱管から剥がれ落ちたものであるため、直線あるいは瓦状の形状を有しており、金属光沢は見られない。
- 金属片 (異物) とスラッジの違いは小型カメラにより判別可能であるが、判断に迷った場合は回収して確認している。

4号機 22回定期検査  
金属片



4号機 22回定期検査  
スラッジ

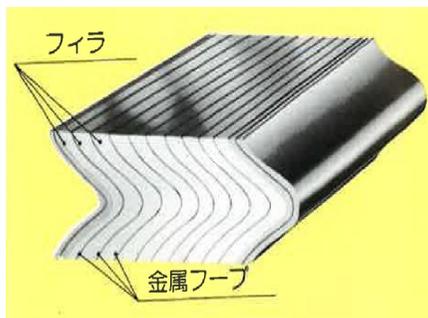


3号機 24回定期検査  
スラッジ

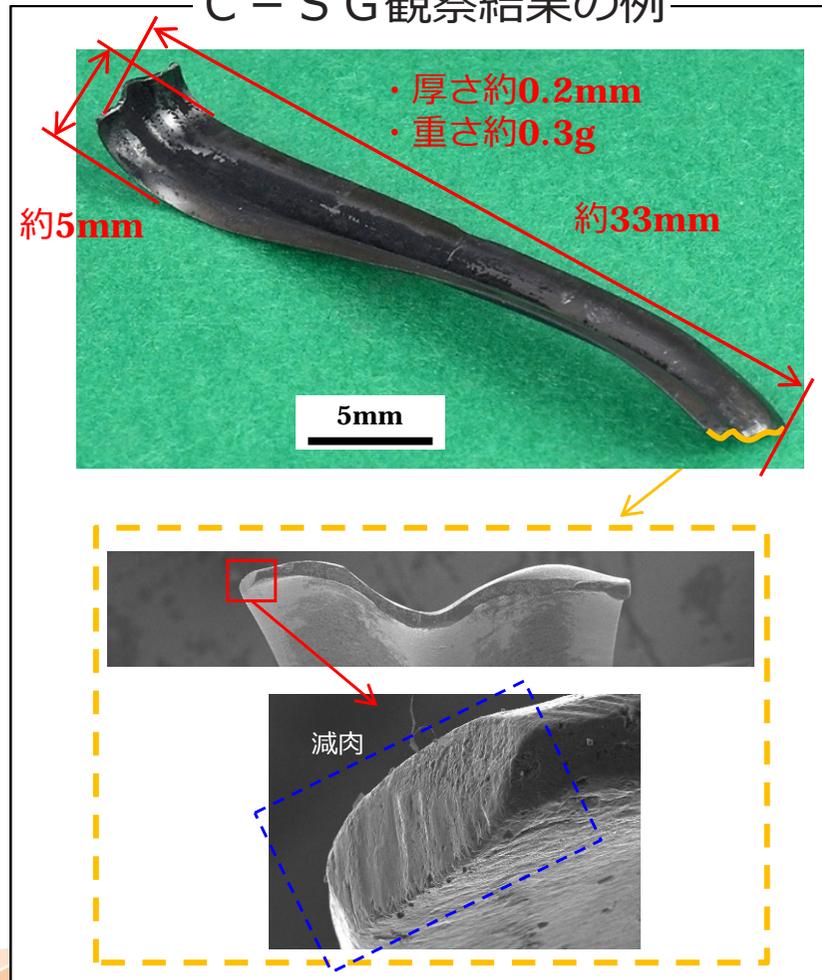


- A、C-SGより回収した金属片について分析を実施した。
- 材質はいずれもオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304相当)
- 類似する形状の資材を確認したところ、幅約5mmのうず巻きガスケットの一部 (フープ材) であると推定
- 走査型電子顕微鏡により観察した結果、部分的な筋状の擦れ跡、摩耗、減肉などを確認

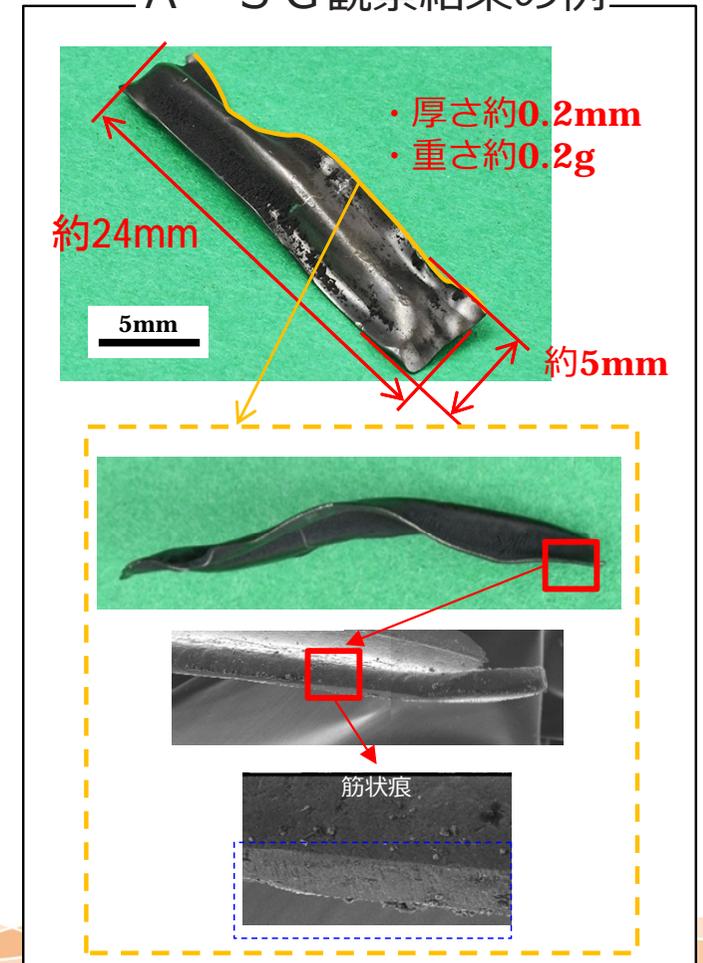
うず巻きガスケット  
<イメージ図>



C-SG観察結果の例



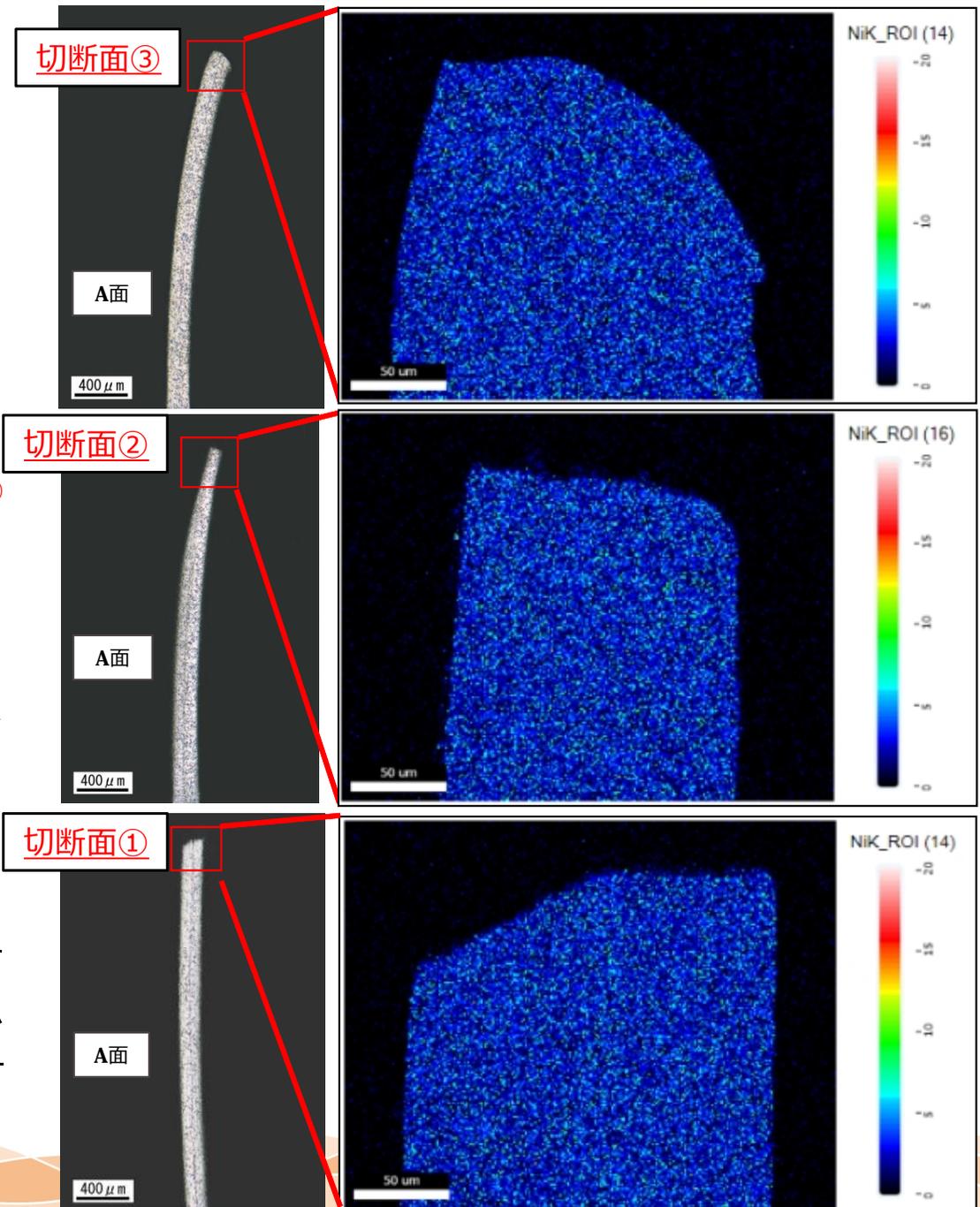
A-SG観察結果の例



- C-SGで回収した金属片が伝熱管と接触したと推定される角部に伝熱管の主成分であるニッケル (Ni) の付着があるかどうかを調査するため、角部を切断して断面の化学分析を実施した。

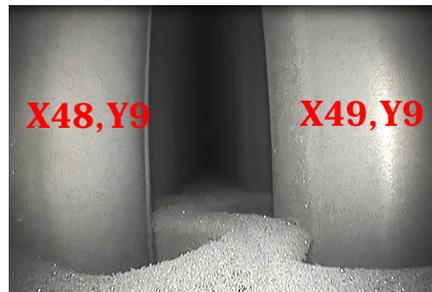


- 化学分析の結果、どの切断面においても、表層には伝熱管の成分と考えられるNi成分は検出されなかった。  
なお、過去の美浜3号機の異物によるSG伝熱管損傷事象 (2000.9.1損傷確認)では、原因となった異物の表面の付着物分析を行った結果、スラッジの主成分であるマグネタイト以外は認められなかった。



- S G器内の第三管支持板から第七管支持板の上面を小型カメラにて目視点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

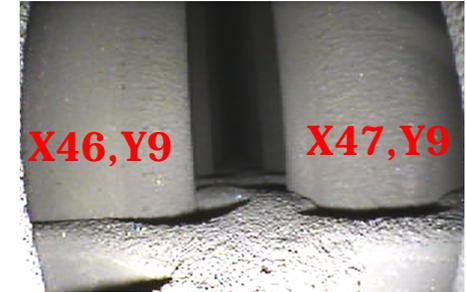
A - S G  
点検結果の例



第三管支持板上

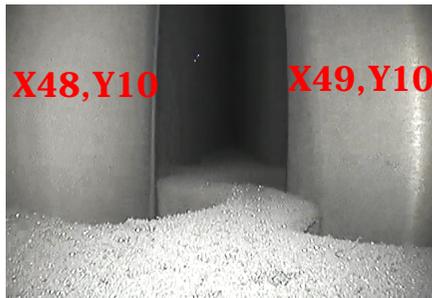


第五管支持板上

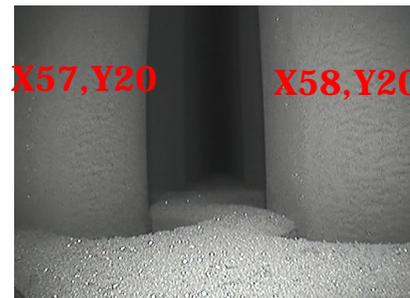


第七管支持板上

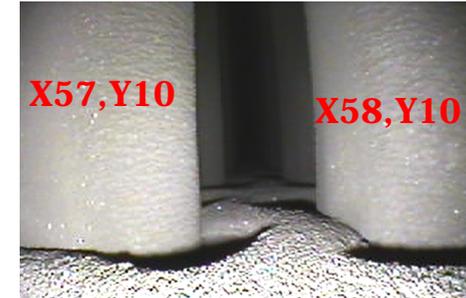
B - S G  
点検結果の例



第三管支持板上

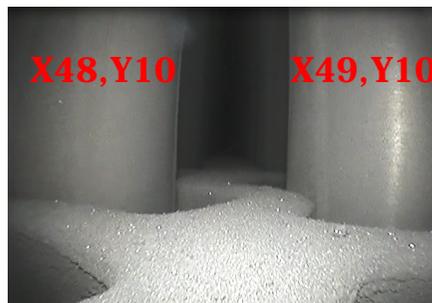


第五管支持板上



第七管支持板上

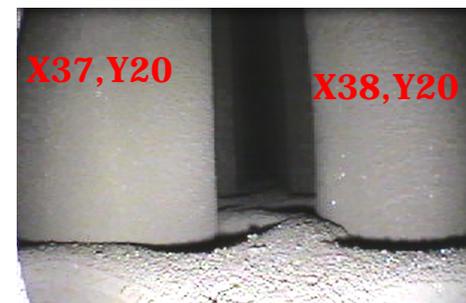
C - S G  
点検結果の例



第三管支持板上



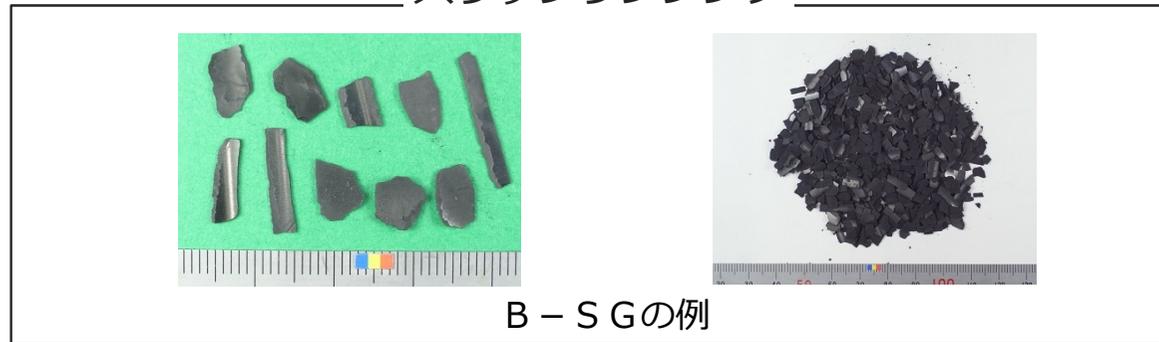
第五管支持板上



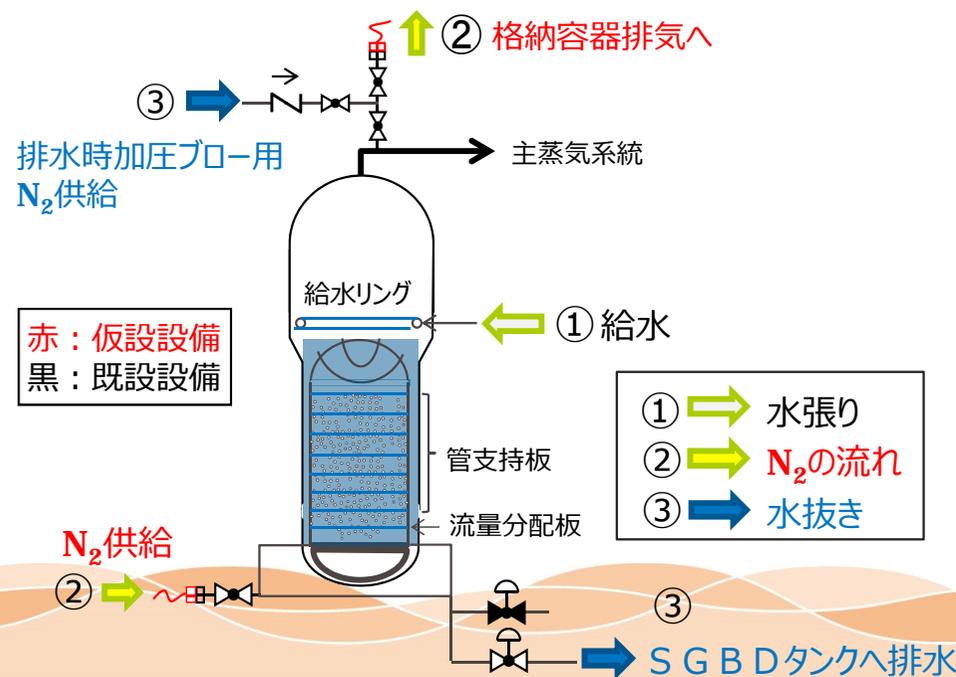
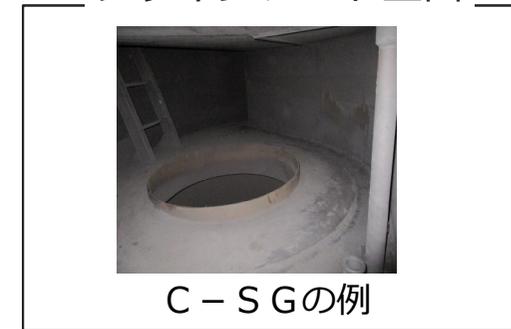
第七管支持板上

- 管板部に堆積したスラッジを除去するスラッジランシングを実施した結果、スラッジ以外に**異物は確認できなかった**。
- SG上部構造物は構造上異物が湿分分離器を通過することはないため湿分分離器よりも下部に設置されているデッキプレート上面についても確認した結果、**異物は確認できなかった**。
- 更なる異物調査として、SG器内に水を張り、底部から**N<sub>2</sub>を噴射**させたのち、水を抜くことによる異物回収 (N<sub>2</sub>バブリング) を実施した結果、**スラッジ以外に異物は確認されなかった**。

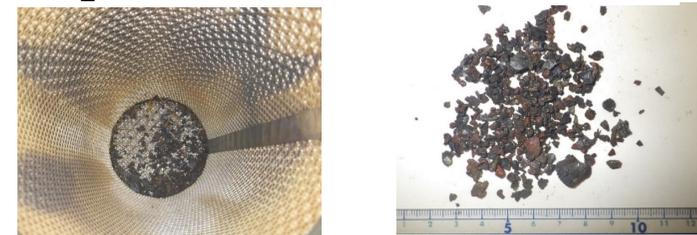
スラッジランシング



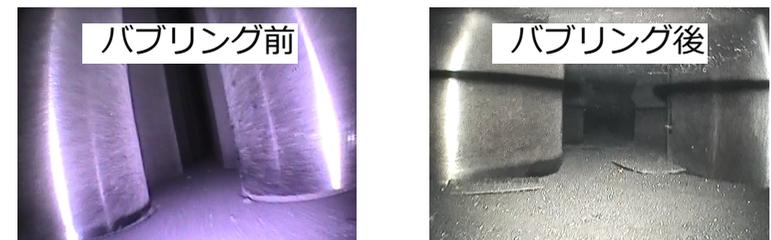
デッキプレート上面



N<sub>2</sub>バブリングによる回収スラッジ



N<sub>2</sub>バブリング前後のSG器内(管板)写真



B-SGの例

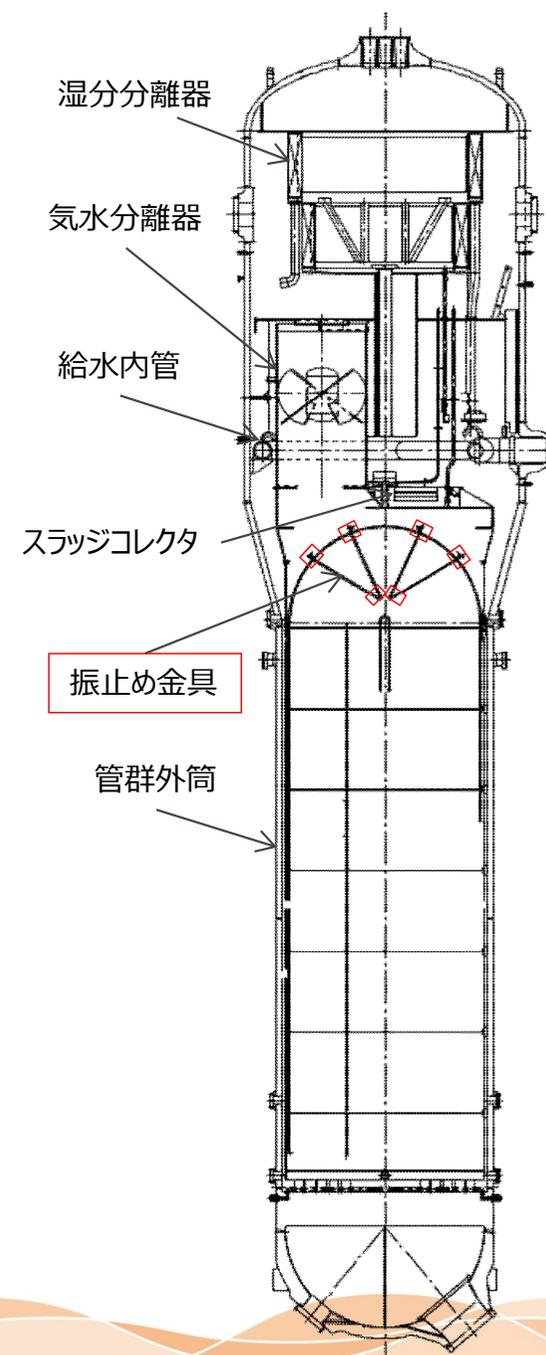
## 2. 原因調査（SG内部品の脱落調査 1 / 2）

○今回の異物の想定形状※に対して、SG内部品で該当する形状があるかを設計図面により確認した。

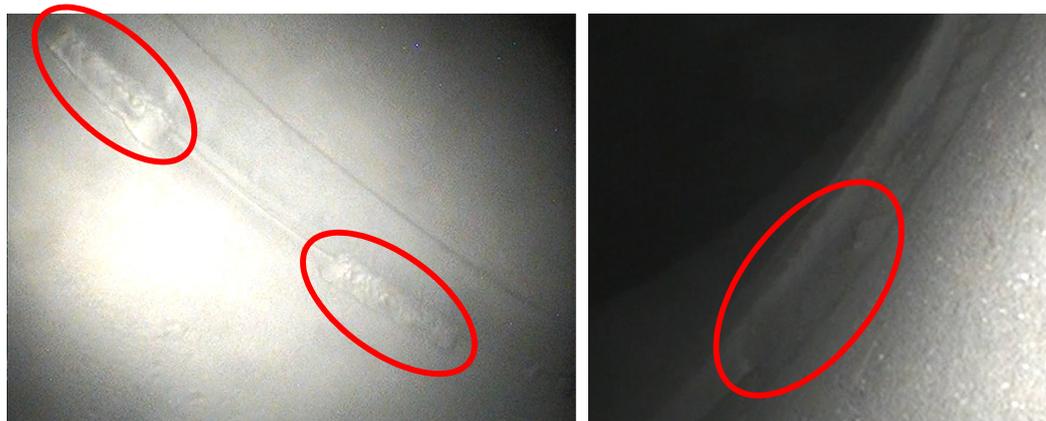
- ・ 振止め金具のキー固定板等が、内部品として使用されていることを確認した。
- ・ これらの内部品は、溶接止めされていること又は周囲を溶接止めされた構造物に囲まれており、万が一、脱落したとしても周囲の構造物の外にはでないことから、**内部品の脱落の可能性はない**と考えられる。

※：異物の想定形状については、「3. 減肉メカニズム」の項で後述する。

内部品	部品名	サイズ(mm)	
		板厚	長さ/幅
振止め金具	キー固定板		
振止め金具	板ばね		



- 異物の想定形状とは異なるものの、S G 器内の2次側の経年劣化事象を起因とする脱落については、流れ加速型腐食による給水内管裏当金の脱落が考えられる。当該部のカメラによる目視点検を実施した結果、給水内管裏当金の溶接部に損傷は確認されなかった。  
 なお、A、C - S G で発見された金属片は、S U S 3 0 4 相当品であることから、S G 内部品ではない。



給水内管裏当金部点検結果  
(B - S G の例)

S G 2次側内部品	材料
湿分分離器	
気水分離器	
給水内管	
スラッジコレクタ	
振止め金具	
管群外筒	

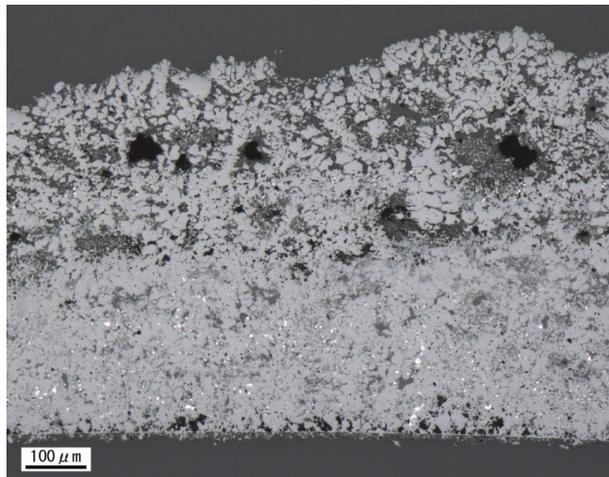
S U S 3 0 4 相当品でないことを確認



: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

- スラッジは、マグネタイト（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）の付着がベースとなって形成されており、マグネタイト単体としては伝熱管よりも硬いものの、スラッジ内には空隙が存在するため、スラッジ自体は脆い性質であると考えられる。
- スラッジによる伝熱管摩耗試験を実施した。試験条件については、スラッジの伝熱管への押付力を実機相当の1 Nとし、摺動速度や接触角度については保守的にスラッジが摩滅しにくくなるよう調整した。その結果、スラッジの方が伝熱管よりも十分早く摩滅していくことを確認した。

以上から、スラッジにより今回の摩耗減肉が生じた可能性は低いと考えられる。



スラッジの断面観察結果  
(A-SGより採取)

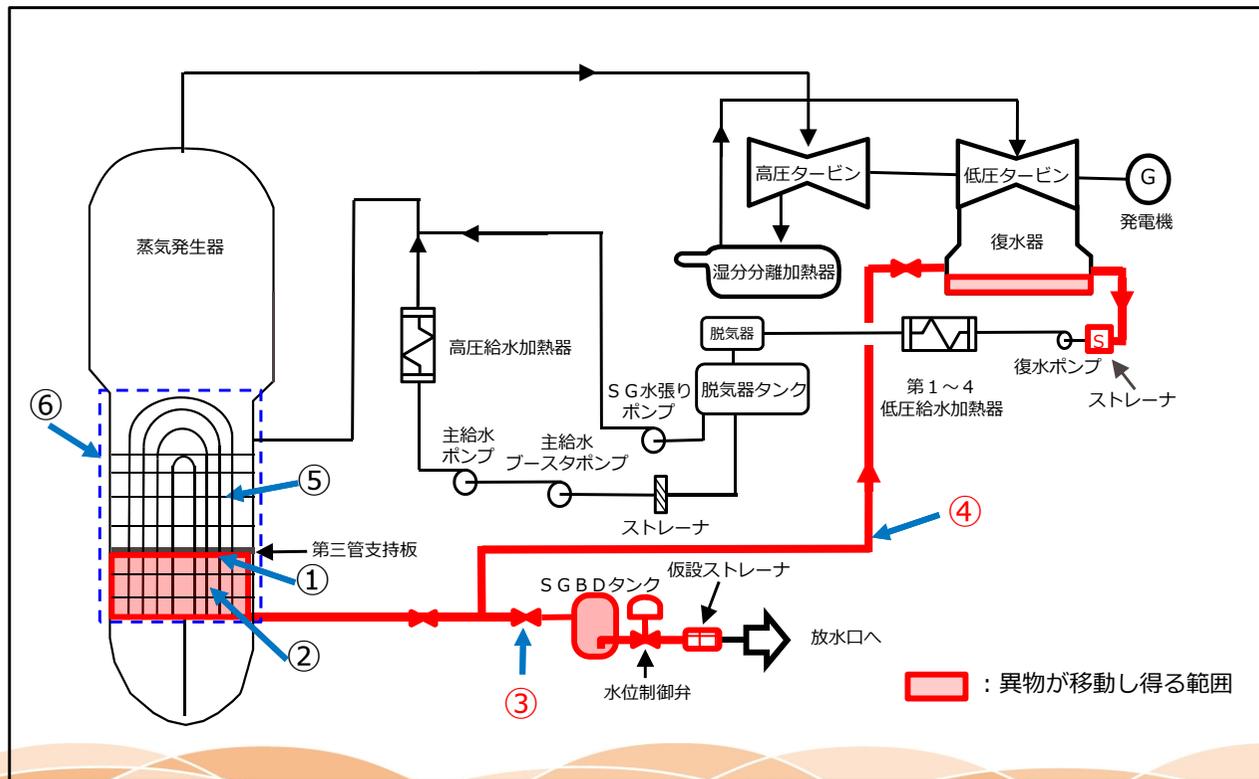
摩耗量比 最大ケース	試験前	試験後
伝熱管		
スラッジ		

約4倍の  
早さで摩滅

## 【点検フロー】

### <SG器外における異物点検内容>

- 異物が移動し得る箇所である③ S G B D系統のうち異物滞留箇所を点検
- 異物が移動し得る範囲のうち、異物が留まる可能性は低いが異物の移動経路となっている④ S G B D系統の配管を確認



① 第三管支持板下面の減肉伝熱管周辺

↓ 減肉指示を確認した伝熱管周辺部（第三管支持板の下面）を小型カメラで目視点検

② 異物が落下する可能性のある範囲

↓ 管板、流量分配板、第一から第二管支持板の上面の全ての範囲を小型カメラで目視点検

③ S G B D系統のうち異物滞留箇所

↓ S G B D系統のうち異物が滞留しやすい構造となっている制御弁等を開放点検

④ S G B D系統の配管

↓ 異物が滞留する可能性は低いものの、配管内を小型カメラで目視点検

⑤ 第三から第七管支持板上面

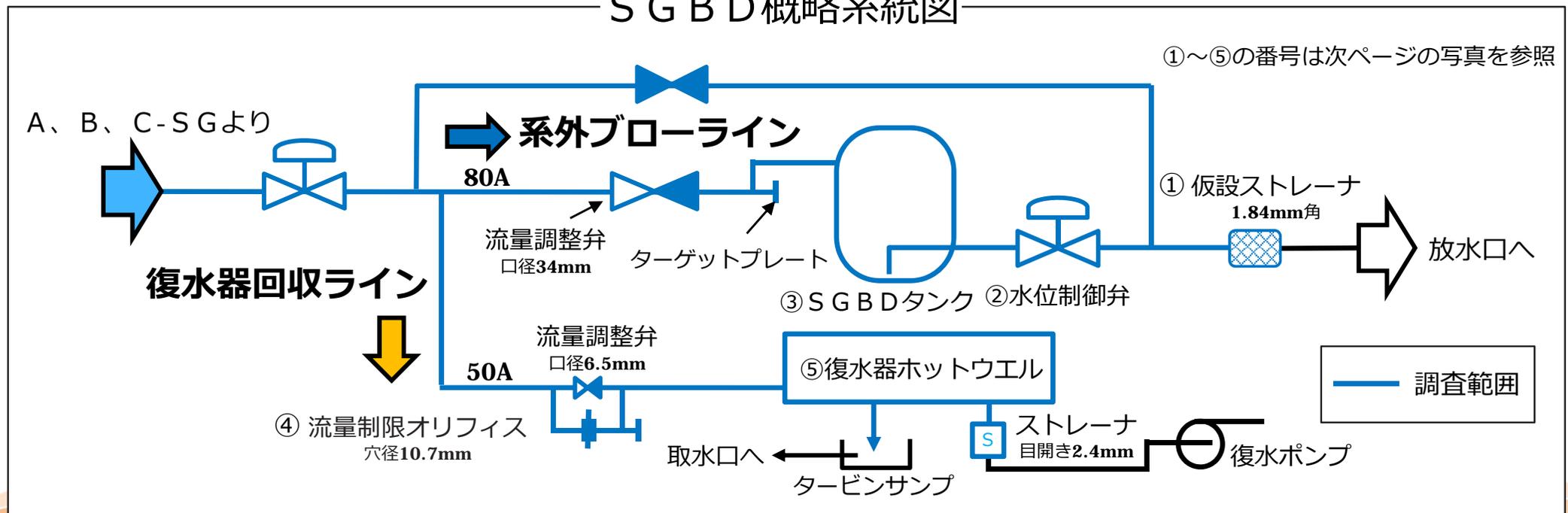
↓ 異物がないことを確認するため、第三管支持板から第七管支持板上面を小型カメラで目視点検

⑥ N<sub>2</sub>バブリング

更なる調査として、SG器内の底部からN<sub>2</sub>を噴射させ、その後水を抜き管板上を点検

- 高浜4号機第22回定期検査時のSG伝熱管損傷事象を踏まえ、SGブローの前に系外ブローラインに仮設ストレーナを設置し、SGブロー後に開放点検を実施
- 系外ブローラインにおいて異物が滞留する可能性がある機器のSGBDタンク、水位制御弁およびSGBD配管等の開放点検を実施
- 復水器回収ラインにおいて流量調整弁をバイパスするオリフィスのライン (分岐ライン) から異物が復水器に流入する可能性が否定できないことから、復水器回収ラインの流量制限オリフィス、復水器ホットウェル、復水ポンプ入口ストレーナ等の開放点検を実施

SGBD概略系統図

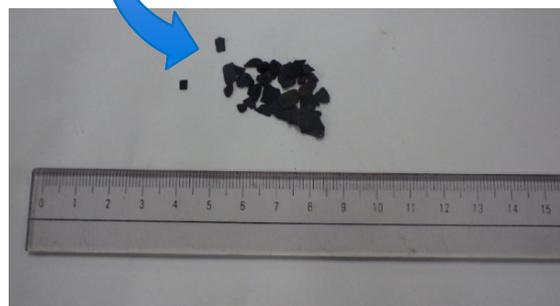


- 仮設ストレーナを確認した結果、スラッジを確認したが異物は確認できなかった。
- 系外ブローラインを確認した結果、異物は確認できなかった。
- 復水器回収ラインを確認した結果、異物は確認できなかった。なお、異物が復水器ホットウェルへ流入した場合、タービンサンプへ流出する可能性は否定できない。

### 点検結果の例

①～⑤の番号は前ページの系統図を参照

#### 【①仮設ストレーナ】



回収物の大きさ  
Max：約8mm×5mm×厚さ約1.0mm  
回収量：約0.8g  
回収物はスラッジと思われる。

#### 【復水器回収ライン】



②水位制御弁内部

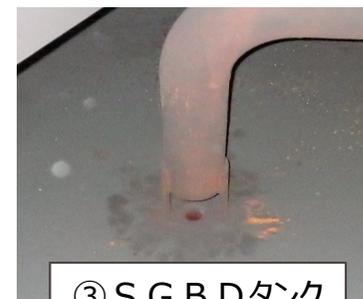


④流量制限オリフィス (A-SGの例)



⑤復水器ホットウェル (B-1の例)

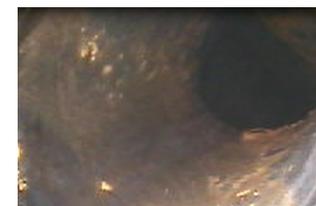
#### 【系外ブローライン】



③SGBDタンク

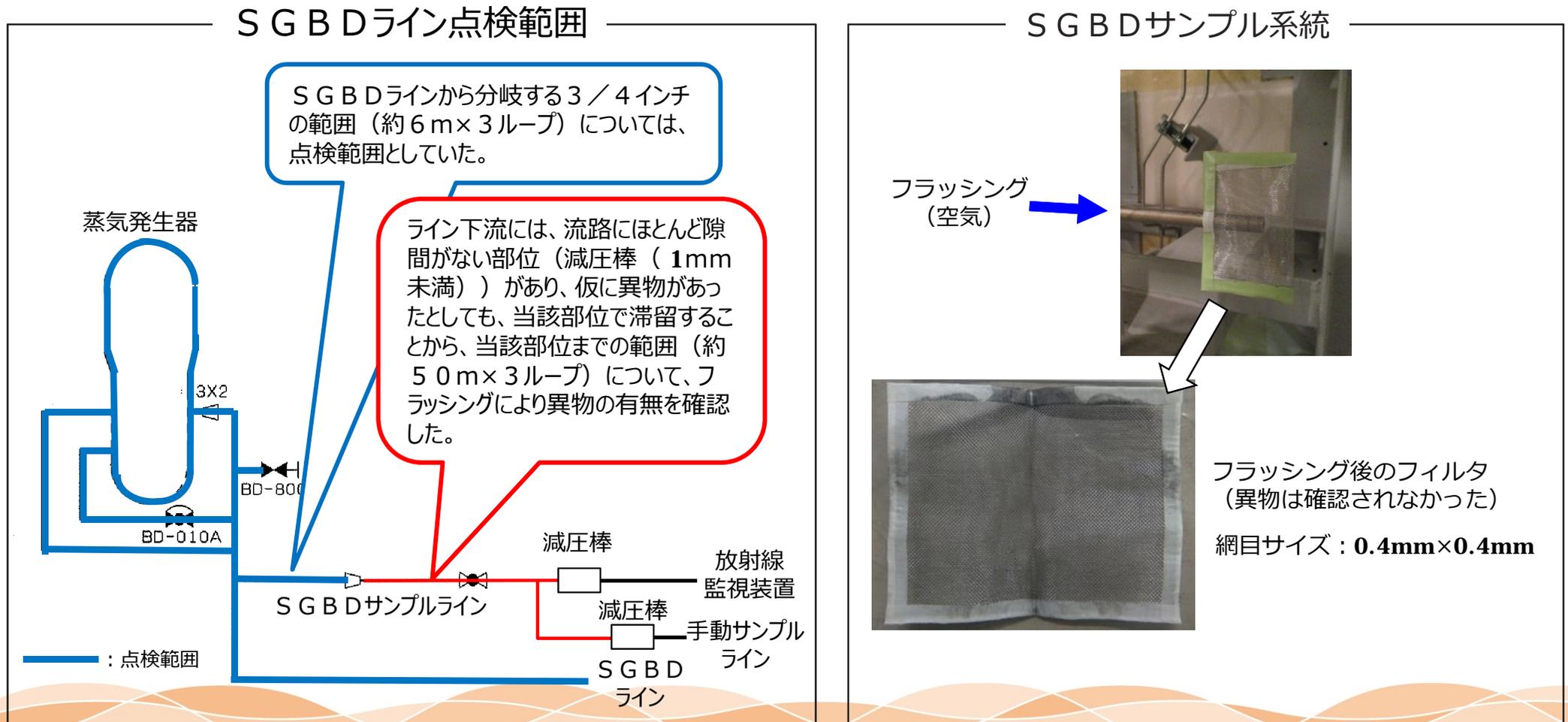


SGBDタンク行配管



SGBDタンク出口配管

- SGBDサンプルラインについては、異物が流入する可能性が考えられる3 / 4インチ※<sup>1</sup>以上の配管を対象とし小型カメラでの点検範囲としていたが、異物が流入する可能性は極めて低いものの、3 / 8インチ※<sup>2</sup>配管についても念のため空気でのフラッシングを実施した結果、異物は確認できなかった。
- SGBDラインについては、分岐管を含めた異物が流入し得る範囲の全てについて、網羅的に確認を実施したことから、当該ラインにおいて異物が残留している可能性はない。



※ 1 : 外径 27.2 mm、内径 16.2 mmの配管、※ 2 : 外径 9.53 mm、内径 6.23 mmの配管

- A、C - S Gでそれぞれ1つずつの金属片を確認した。
- 金属片はオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304相当）であった。更に、形状の類似性から、金属片はうず巻きガスケットの一部（フープ材）であると推定した。
- 金属片以外は、目視点検およびスラッジランシング、並びにN<sub>2</sub>バブリングを実施した結果、スラッジ以外に異物は確認できなかった。
- S G B D系統の仮設ストレーナ、タンク、水位制御弁および異物が滞留し得る配管等について目視点検等を実施した結果、異物は確認できなかった。
- A、C - S Gで確認した金属片に部分的な筋状の擦れ跡等を確認したこと、また、C - S Gの金属片には一部に減肉が認められたことから、C - S Gの伝熱管のきずは、回収した金属片が伝熱管にきずを付けた可能性は否定できない。
- B - S Gでは異物が確認されていないことから、S G B D系統へ流出した異物が復水器回収ラインを通じて復水器ホットウェルに流入し、タービンサンプへ異物が流出した可能性は否定できない。

○以下の試験および解析により、金属片等の異物による伝熱管の減肉可能性を調査した。

## ①異物形状・接触状態の推定

- ・金属片については、実機伝熱管の減肉痕等の位置関係から接触状態を推定
- ・金属片以外で想定される異物については、実機管支持板の接触痕等の位置関係から異物の形状、接触状態を推定

### <解析・試験>

## ②異物のS G器内挙動の推定・接触状態の再現

- ・熱流動解析によりS G器内で管支持板下面に到達するまでの異物挙動を推定
- ・実機二相流相当のモックアップ試験により①で推定した接触状態の再現性を確認

### <解析>

## ③摩耗形態の推定

- ・異物と伝熱管のどちらの振動で今回の摩耗減肉が生じたかを解析を用いて推定
- ・推定にあたっては、両者の摩耗の仕事率(ワークレート)を算出、比較し、実機の摩耗減肉量が得られるのはどちらになるかを確認

### <試験>

## ④-1 減肉試験

- ・伝熱管、異物を模擬した装置により摩耗減肉を発生させることで摩耗減肉形状を推定

## ④-2 ECTモックアップ試験

- ・減肉試験により得られた摩耗減肉形状と同等の人工欠陥を与えた伝熱管のECT信号を取得し、実機ECT信号と比較  
⇒①で推定した異物形状・接触状態で今回の摩耗減肉形状が得られることを確認

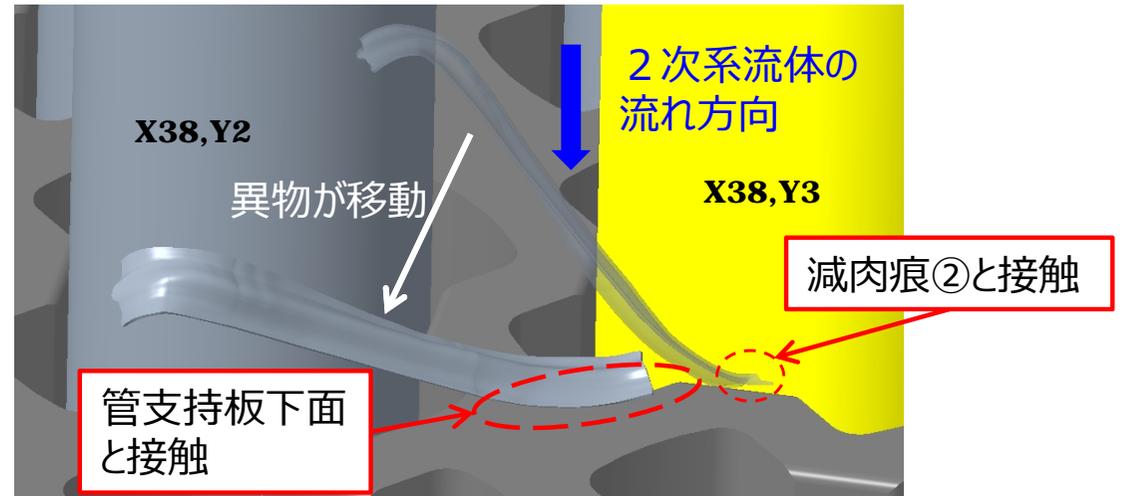
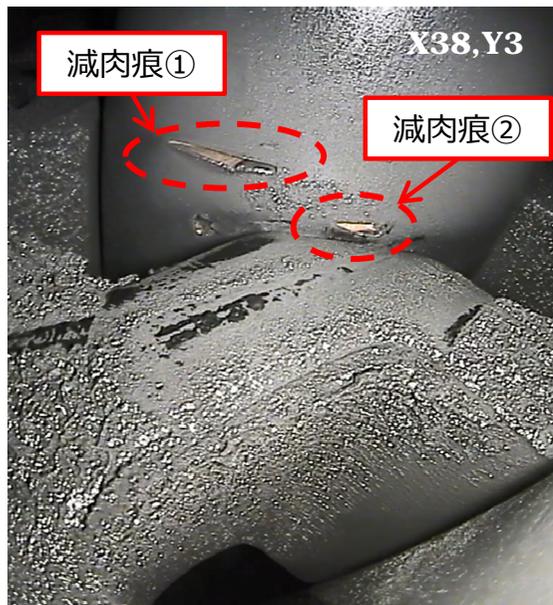
## ⑤摩耗体積の評価

- ・③のワークレートを用いて算出した摩耗体積と、④-2の人工欠陥の体積との比較を実施  
⇒①で推定した接触状態により今回の摩耗量が1サイクルで発生し得ることを確認

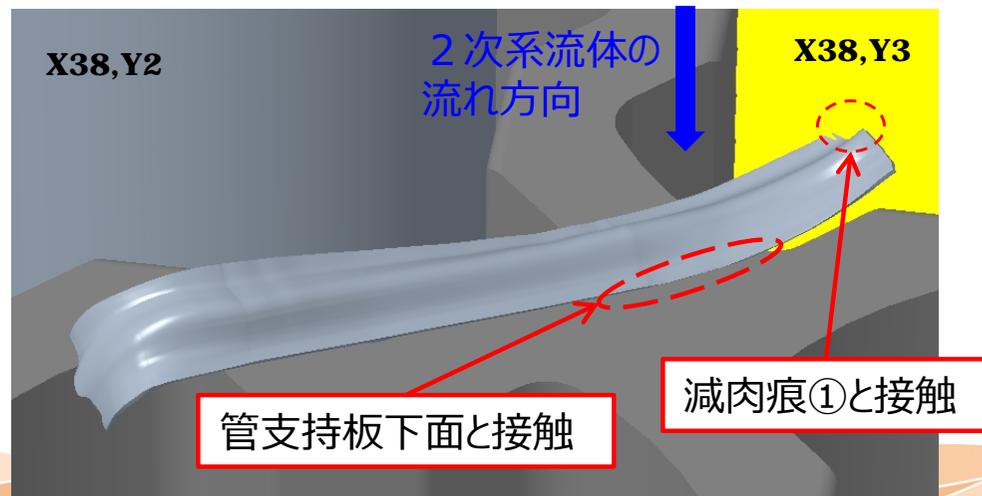
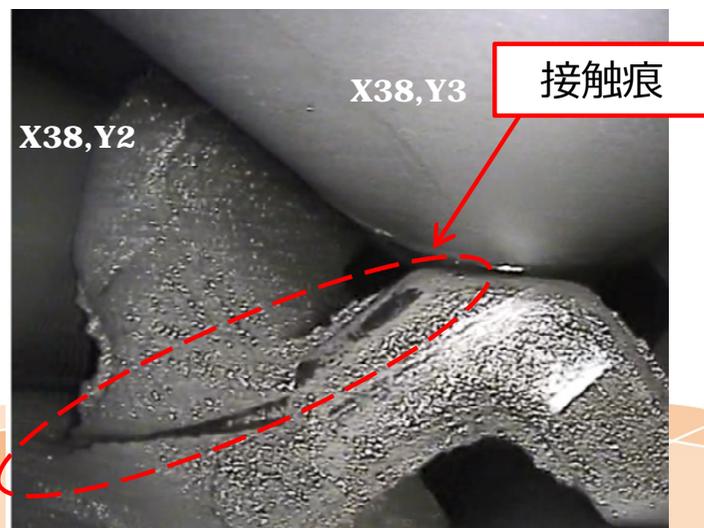
# 3. 減肉メカニズム (①異物形状・接触状態の推定) (1 / 4)

○次の通り、C-S Gの金属片が2箇所での減肉痕と接触するには、2つの姿勢をとる必要があると推定。

- 最初に金属片の角部が②の位置で接触（伝熱管と管支持板の隙間に挟まり拘束）し、管支持板に対して角度を持った姿勢が維持された。
- ②の位置で減肉深さが進展すると金属片の拘束は緩和され、金属片はより安定な姿勢（管支持板下面に張り付く状態）に変化し②の減肉痕を与えた角部が①の位置に接触位置を変えた。



1. 減肉痕②と接触した状態から、伝熱管/管支持板の拘束が外れた状態へと変化

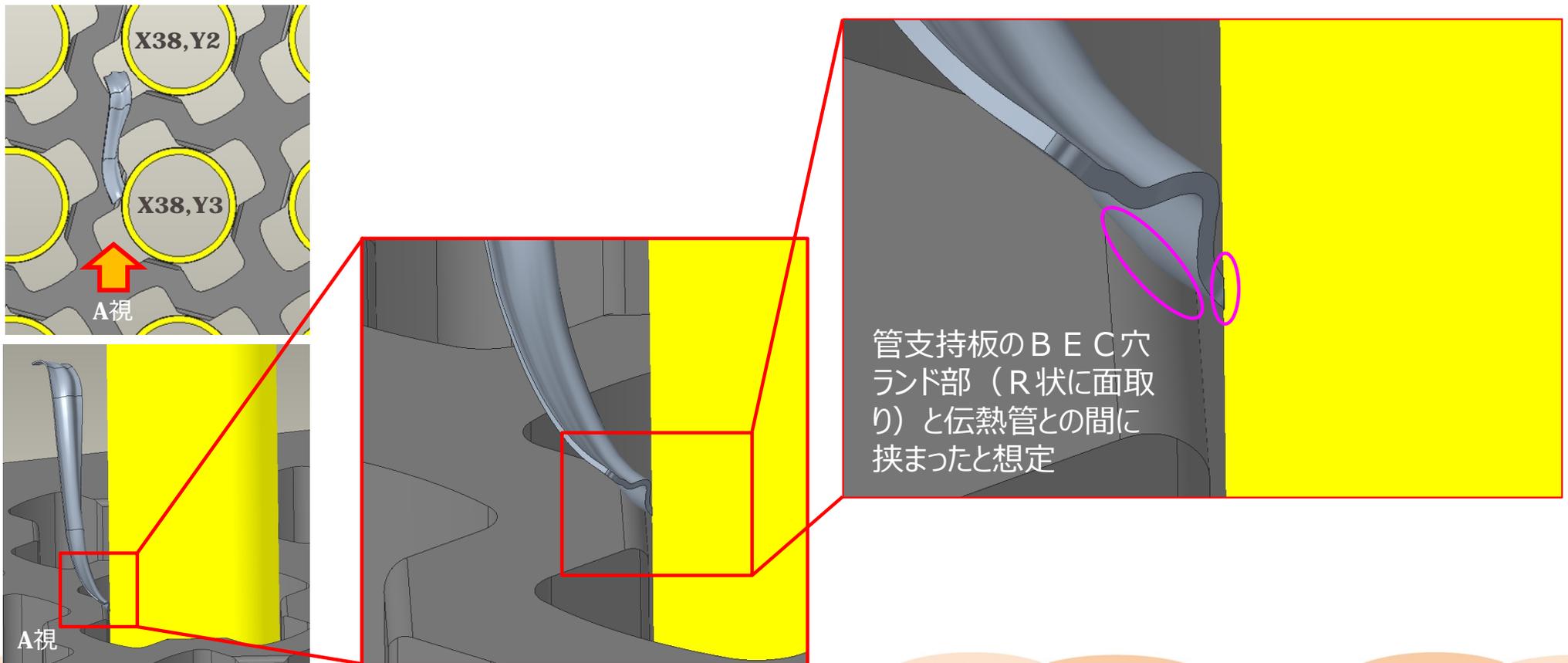


2. 流体力により安定した姿勢となった状態 (減肉痕①と接触した状態) Inc.

○ C - S Gで回収した金属片について、減肉痕②との接触状態の詳細を以下に補足する。

- 管支持板B E C穴のランド部は、角部にR状の面取りが施されており、また、ランド部と伝熱管の間には約   ※の隙間がある。
- 金属片の厚みは約**0.2mm**であることから、幾何学的にこの隙間に挟まることが可能であり、またランド部の角部はR状であることから、金属片は管支持板に対して角度を持った状態で挟まることが可能である。
- 従って、C - S Gで回収した金属片については、高浜4号機前回（第22回）定期検査で想定された異物のように、流体力の作用で管支持板表面に押さえつけられなくとも、端部がB E C穴ランド部と伝熱管の隙間に挟まった状態で支持され、管支持板下面に保持された可能性があると考えられる。

※公称値



# 3. 減肉メカニズム (①異物形状・接触状態の推定) (3 / 4)

○ C - S G 伝熱管の場合、減肉痕①、②との接触する異物には、他に次のパターンが考えられる。

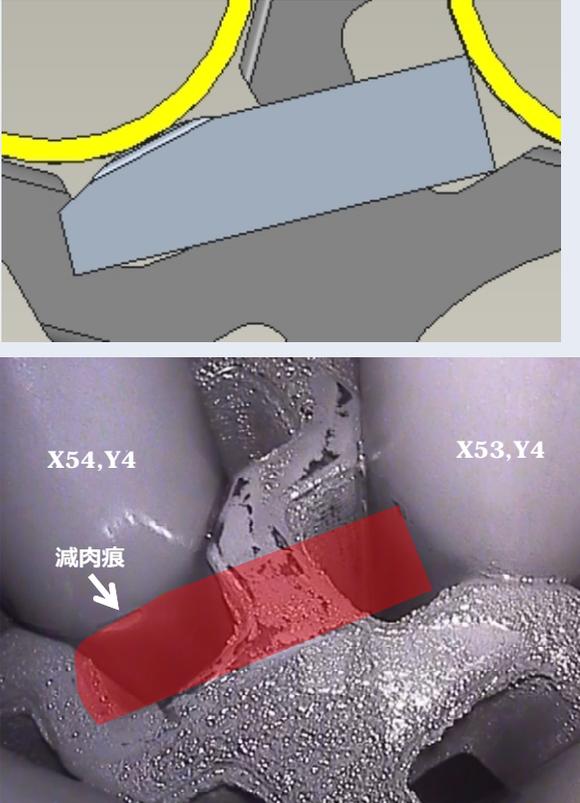
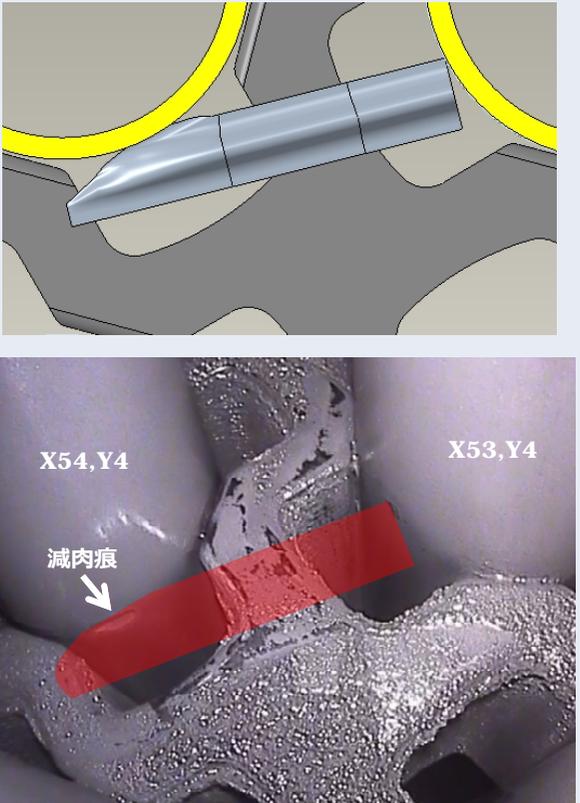
	パターン1		パターン2		パターン3		パターン4	
減肉痕	①	②	①	②	①	②	①	②
異物	想定異物1※		金属片	想定異物2※	想定異物3※		想定異物1※	想定異物2※
外観								
形状	想定異物1：約25mm×約4mm×1mm以下、 想定異物3：約15mm×約7mm×1mm以下		想定異物2：約16mm×約6mm×1mm以下 (参考) 金属片：約33mm×約5mm×約0.2mm					

※管支持板表面の接触痕等と整合するよう異物の形状・位置を想定

想定異物の外観は各パターンで異なるが、いずれも金属片と同等の大きさであり、また伝熱管との接触状態（角部の接触角度）はいずれのパターンにおいても変わらないため、C - S G 伝熱管においては、**23** で推定した金属片単体のパターンを代表に以降の検討を行う。

# 3. 減肉メカニズム (①異物形状・接触状態の推定) (4 / 4)

○ B-S G 伝熱管の減肉痕と接触する異物には、次のパターンが考えられる。

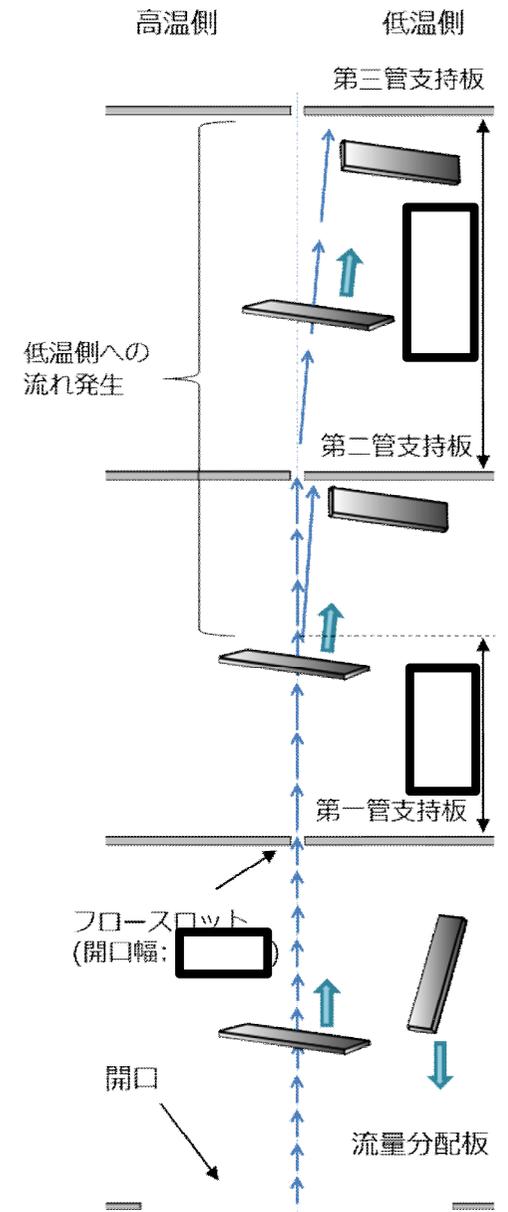
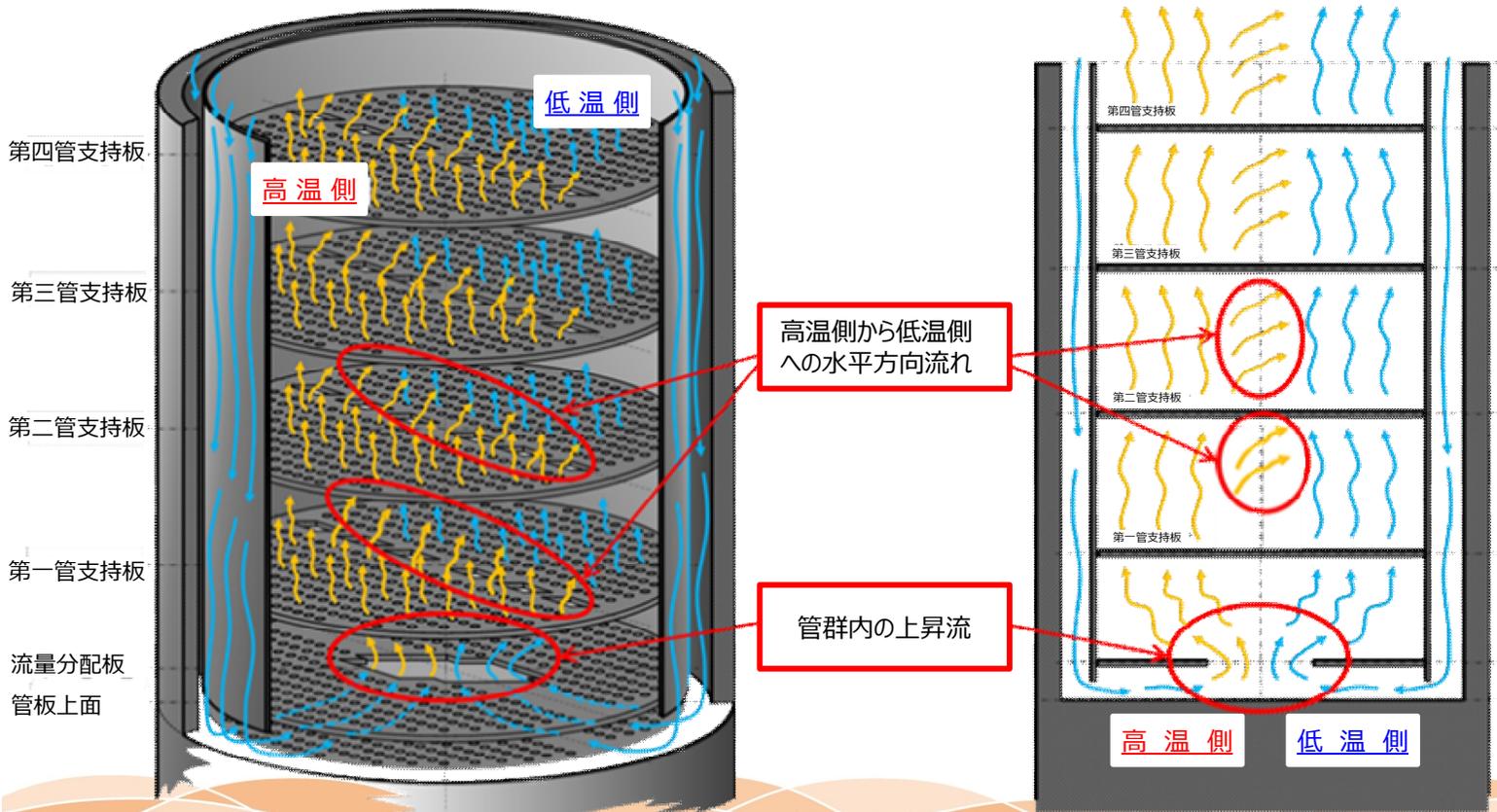
	パターン1	パターン2
異物	想定異物4※1	想定異物5※1※2
外観	 <p>The schematic shows a grey rectangular block with a yellow curved line above it. The photograph shows a red 3D model of a rectangular block on a metallic surface, with a white arrow pointing to a '減肉痕' (material loss mark). Coordinates X54, Y4 and X53, Y4 are marked on the surface.</p>	 <p>The schematic shows a grey tapered block with a yellow curved line above it. The photograph shows a red 3D model of a tapered block on a metallic surface, with a white arrow pointing to a '減肉痕' (material loss mark). Coordinates X54, Y4 and X53, Y4 are marked on the surface.</p>
形状	想定異物4：約24mm×約7mm×1mm以下	想定異物5：約24mm×約5mm×約0.2mm

※1：管支持板表面の接触痕等と整合するよう異物の形状・位置を想定

※2：C-SGの金属片と類似のガスケット片を想定

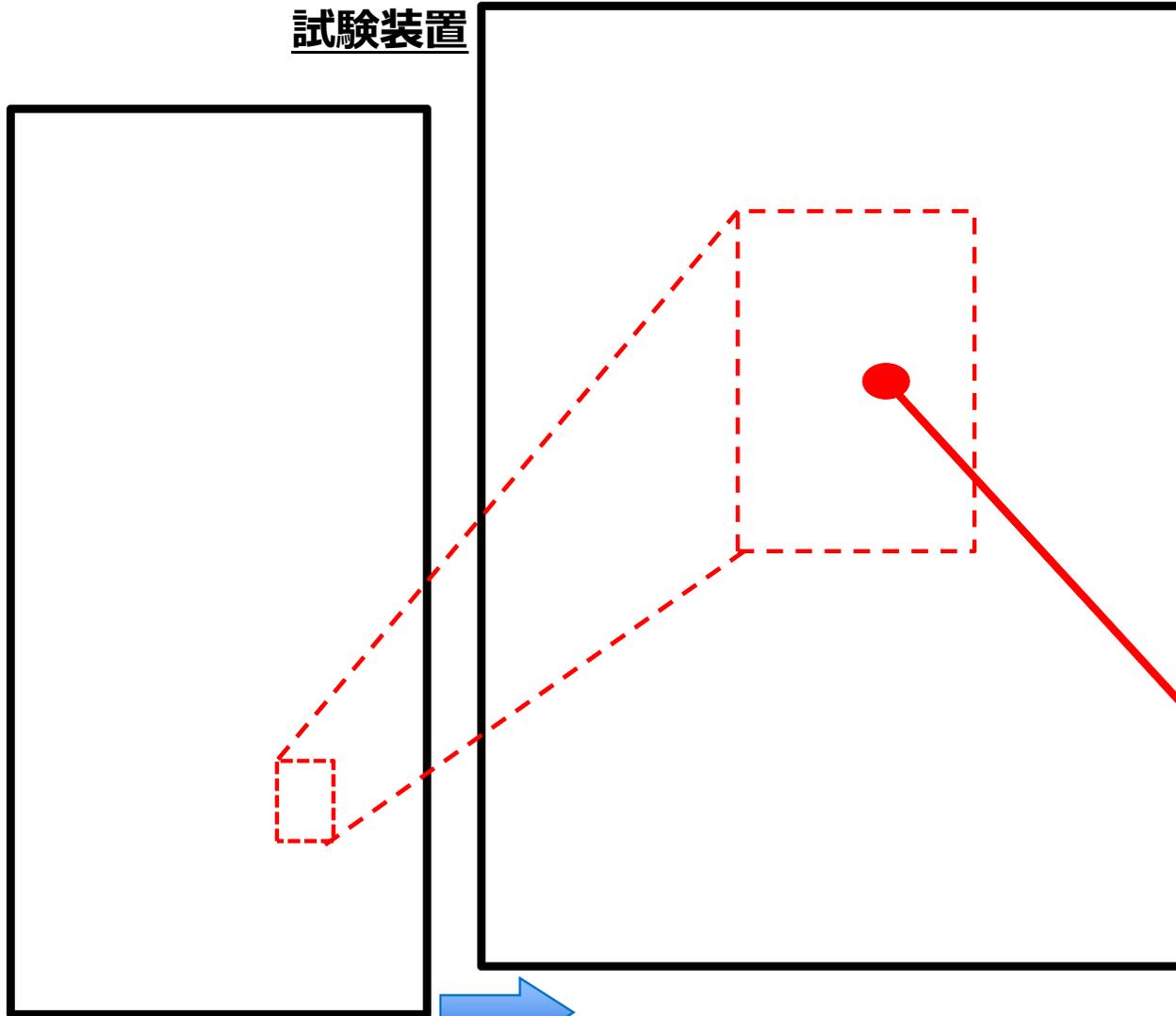
両パターンとも異物の大きさは同等であり、また伝熱管との接触角度も変わらないため、B-S Gにおいては、パターン1の想定異物を代表に以降の検討を行う。

- 3次元熱流動解析を実施した結果、異物はSG器内に流入後管板上へ到達し、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フロー SLOT部を通過したと考えられる。
- 第一管支持板より上方では、上昇流に加え高温側から低温側への水平方向流があることから低温側へ流れ、第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。



○C-SGの金属片を代表に、SG 2次側の流況モックアップ試験（水空気試験）を実施し、  
①で推定した接触状態が管支持板下面で維持されるか確認を行った。

### 試験装置



### 試験条件

- 試験流速：
- 模擬金属片形状：約33mm×約5mm×約0.2mm  
(金属片と同一形状)

### 装置断面

伝熱管5×5管群

### 試験結果

- 減肉痕①②の姿勢とも管支持板下面で維持されることを確認
- 減肉痕①の結果から、C-SGの金属片と同等の大きさである他の想定異物も管支持板下面に張り付く可能性を確認



3次元熱流動解析で得られるSG 2次側流況を再現



: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

○管支持板下面で摩耗減肉が発生する場合、以下の2つのケースが考えられる。

- ・ 金属片または金属片以外の異物の振動による摩耗
- ・ 伝熱管の振動による摩耗

○減肉量（摩耗体積）は、下記の一般式を用い算出できることから、ワークレートを求め、摩耗体積の評価を行う。

<Archardの式>

$$V = W_s \times \underbrace{F \times v \times T}_{W_R}$$

$V$  : 摩耗体積 [m<sup>3</sup>]

$W_s$  : 比摩耗量（材質の組合せと摩耗モードで決まる材料係数：金属片と同材のSUS304を使用） [m<sup>2</sup>/N]

$F$  : 押付力 [N]

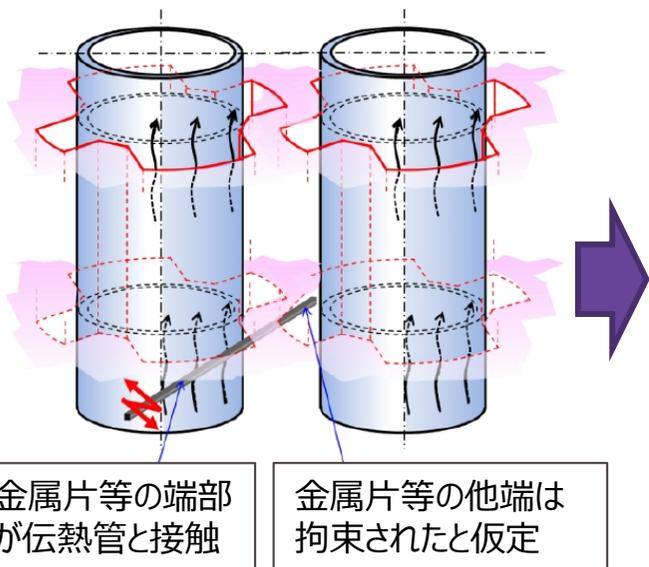
$T$  : 運転時間 [s]

$v$  : 摺動速度 [m/s]

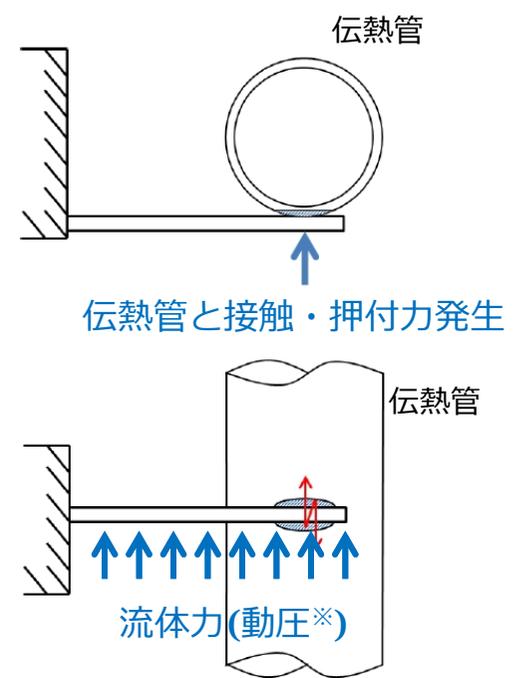
$W_R$  : ワークレート (=  $F \times v$  : 摩耗を生じさせる仕事率) [W]

今回認められた減肉量を再現するには、1mWオーダーのワークレートが必要であることから、上記2つのケースについて検証する。

- 金属片または金属片以外（金属片等）の異物振動のケース
  - ・金属片等の異物の端部が拘束されたと想定する（片持ち梁と仮定）。
  - ・金属片等の異物の形状では流体力を受ける面積が小さいため、ワークレートは小さく、有意な摩耗減肉が発生しないことを確認した。



**減肉メカニズム概要**



**計算モデル (片持ち梁)**

※：3次元熱流動解析により算出

<片持ち梁の場合のワークレート計算式>

$$W_R = F \times 2L / \zeta \times f$$

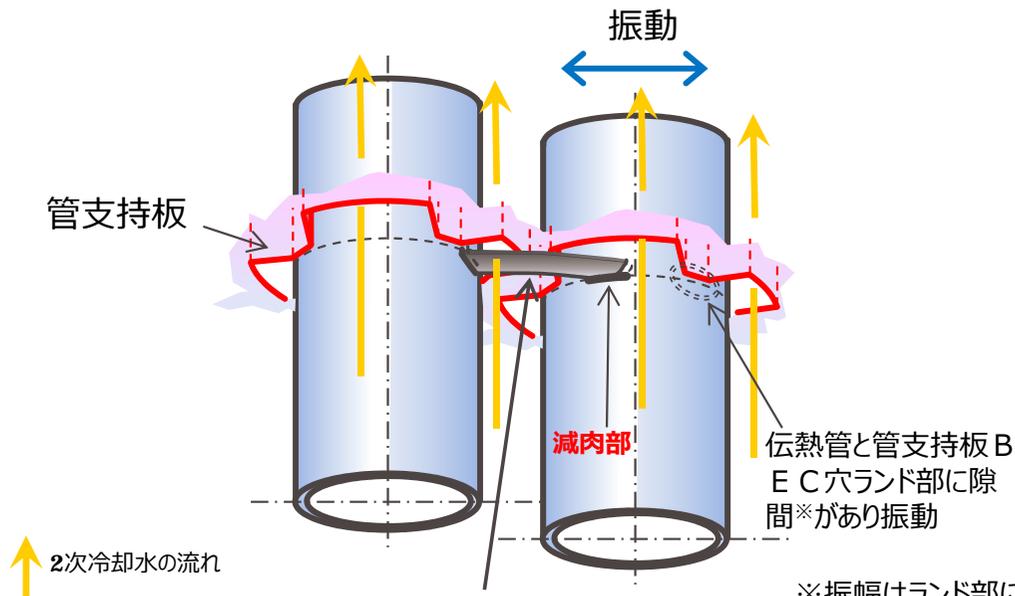
- $W_R$  : ワークレート[W]
- $F$  : 押付力[N]
- $L$  : 静的振幅[m]
- $\zeta$  : 接触物の減衰比[%]
- $f$  : 固有振動数[Hz]

**ワークレート試算結果**

押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量再現可能性
約1	< 0.01	×

## ○伝熱管振動のケース

- ・2次冷却水の流れによる伝熱管のランダム振動により伝熱管自身に摩耗減肉が発生することを想定する。
- ・流動振動解析によりワークレートを試算すると、金属片等の異物振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。



**金属片等の異物  
(管支持板下面で保持)**

## ワークレート試算結果

押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量再現可能性
約1	約3	○

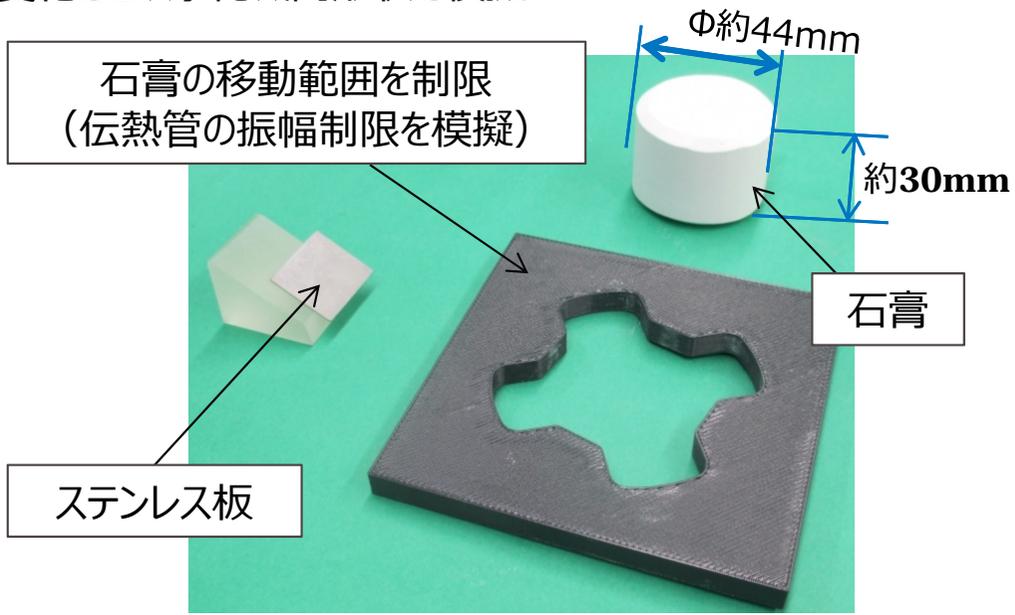
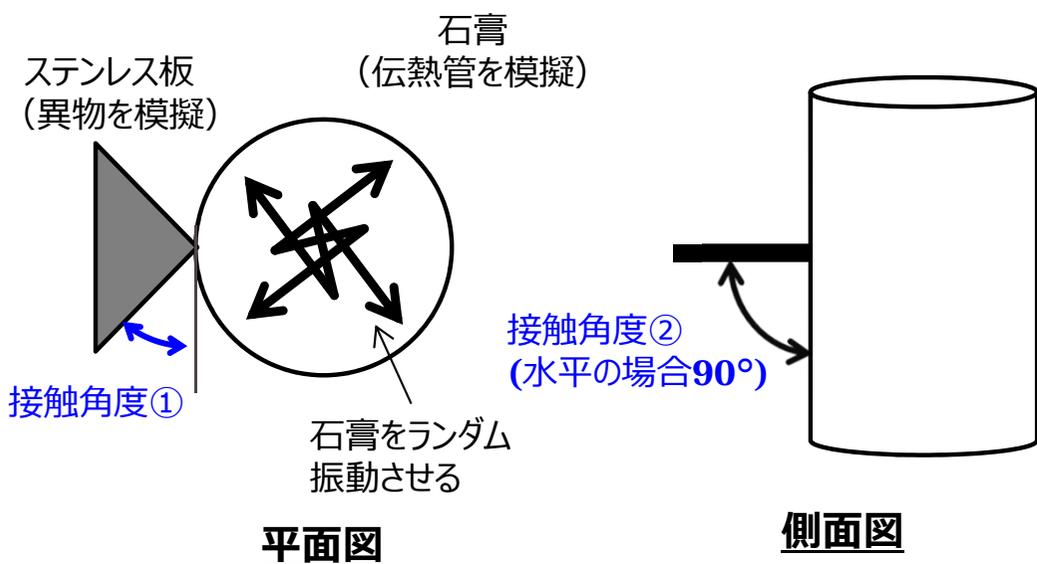
※振幅はランド部により制限されており、減肉深さには上限がある。

今回の摩耗減肉は、伝熱管振動によって生じたものと推定される。

○①で推定した異物形状・接触状態によりどのような摩耗減肉形状が生じるか把握するため、模擬減肉試験（加速試験）を実施した。

<試験方法>

- ・伝熱管は石膏で、金属片等の異物はステンレス板で模擬
- ・ステンレス板に石膏を接触させ、石膏を振動させることにより摩耗減肉を模擬
- ・ステンレス板の接触角度（①接線方向および②軸方向）を変化させ、摩耗減肉形状を模擬



装置外観（実機2倍スケールで模擬）

<試験条件>

対象伝熱管		振動モード	接触角度①※	接触角度②※	振動振幅（2倍スケール）
C-SG : X38, Y3	減肉痕①	伝熱管 振動	20°	120°	[Redacted]
	減肉痕②		45°	120°	
B-SG : X54, Y4			10°	160°	

[Redacted] : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

※①で推定した接触状態より設定  
The Kansai Electric Power Co., Inc.

# 3. 減肉メカニズム (④-1 減肉試験) (2/3)

○ C-SGの減肉痕①および②について、次のとおり減肉形状を取得した。

## <減肉痕①>

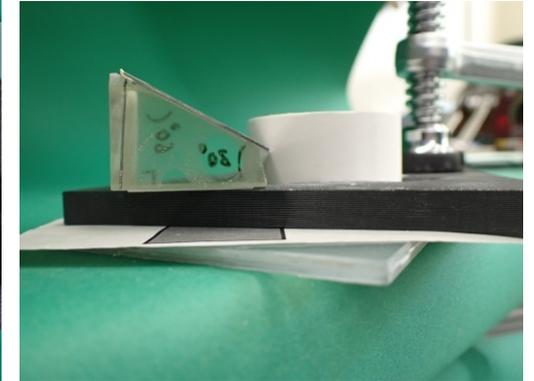
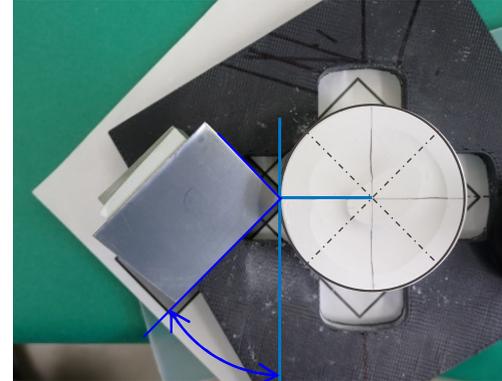
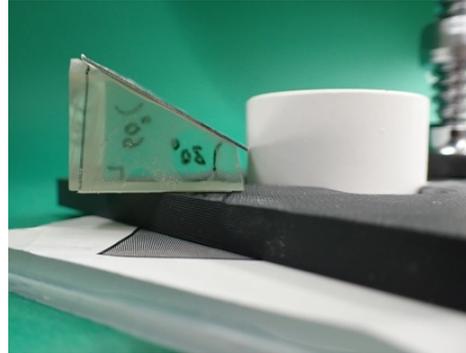
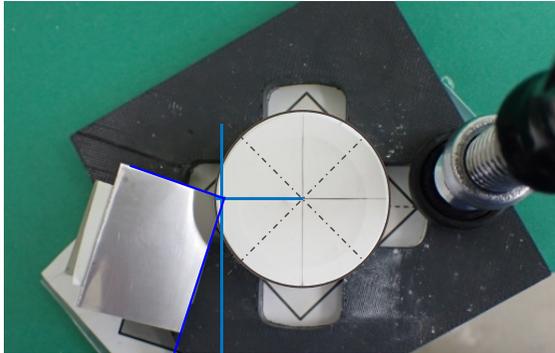
## <減肉痕②>

接触角度① : 20°

接触角度② : 120°

接触角度① : 45°

接触角度② : 120°



約20°

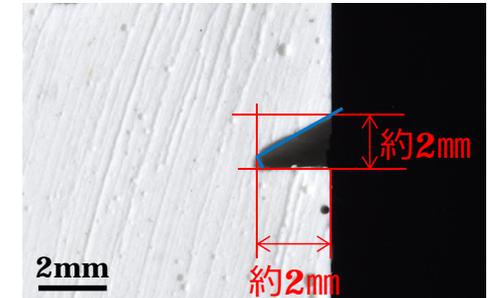
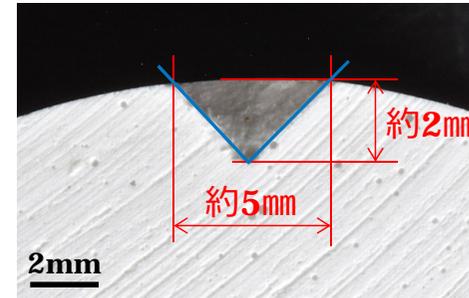
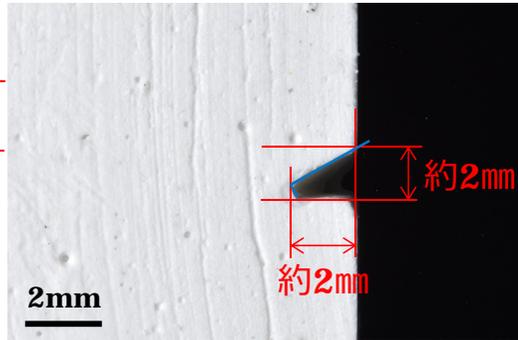
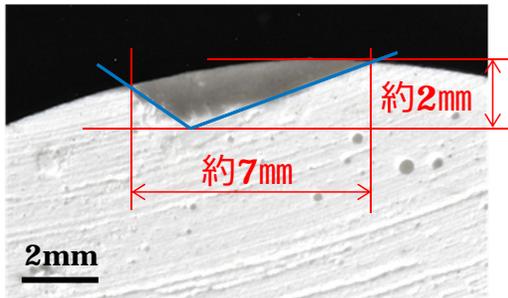
約45°

周方向断面

軸方向断面

周方向断面

軸方向断面



減肉痕①	減肉試験結果	実機相当寸法※
深さ	約2mm	約0.8mm
周方向長さ	約7mm	約3mm
軸方向長さ	約2mm	約0.7mm

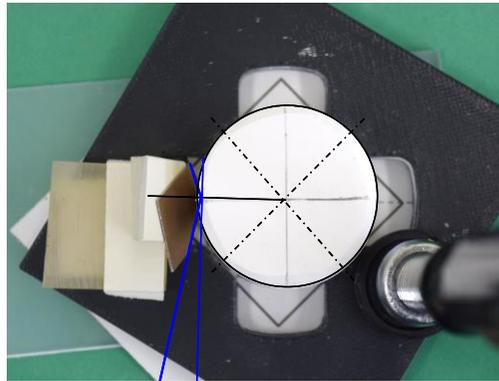
減肉痕②	減肉試験結果	実機相当寸法※
深さ	約2mm	約0.4mm
周方向長さ	約5mm	約1mm
軸方向長さ	約2mm	約0.4mm

※実機 E C T 信号の深さを基準に補正

# 3. 減肉メカニズム (④-1 減肉試験) (3 / 3)

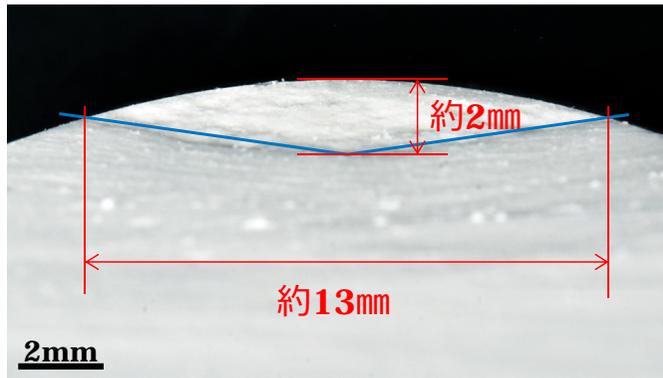
○ B - S Gの減肉痕について、次のとおり減肉形状を取得した。

接触角度① : 10°

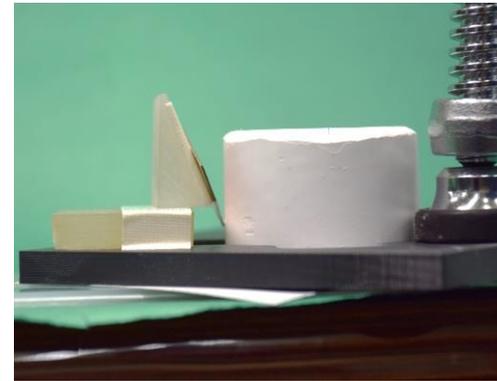


約10°

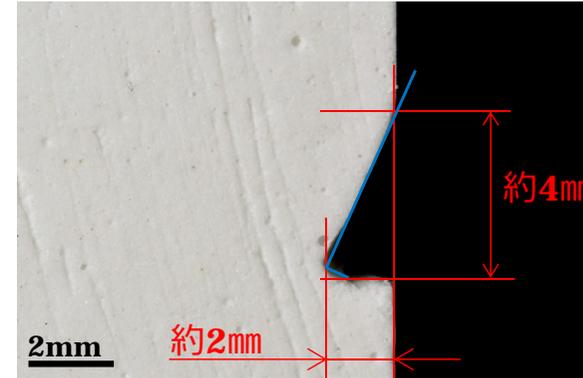
周方向断面



接触角度② : 160°



軸方向断面



	減肉試験結果	実機相当寸法※
深さ	約2mm	約0.4mm
周方向長さ	約13mm	約3mm
軸方向長さ	約4mm	約1mm

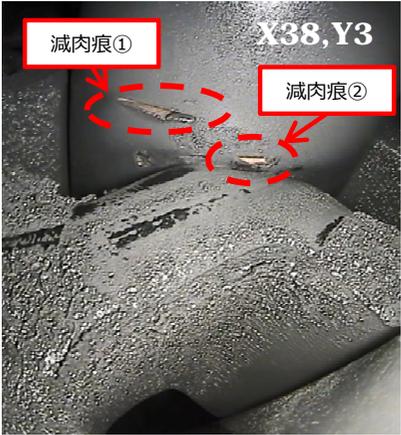
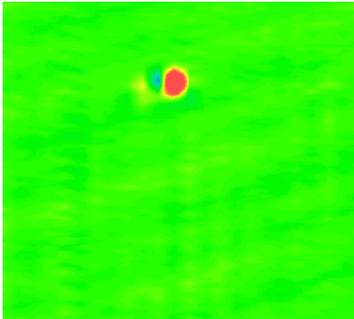
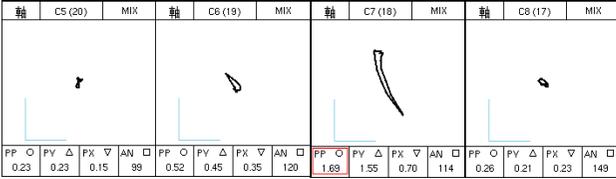
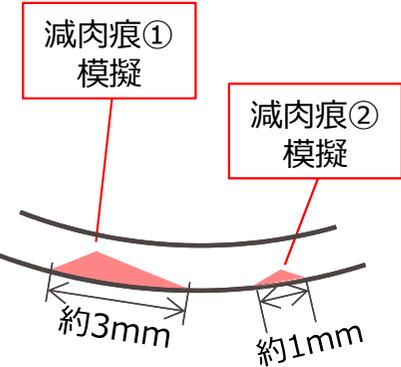
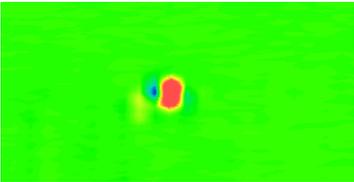
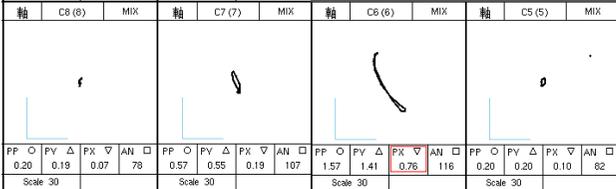
※実機 E C T 信号の深さを基準に補正

# 3. 減肉メカニズム (④-2 ECTモックアップ試験) (1/2) 35

○ C-SGについて、減肉試験で取得した減肉痕①、②の減肉形状と同等の人工欠陥をTT600伝熱管モックアップに付与し、ECT信号を取得した結果、実機信号と整合することを確認した。

<試験条件>

- ・人工欠陥寸法の幅および長さ：減肉試験で得られた実機相当寸法
- ・人工欠陥寸法の深さ：実機のECT信号

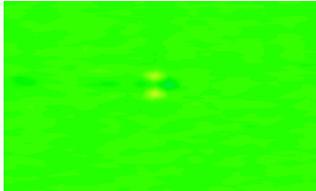
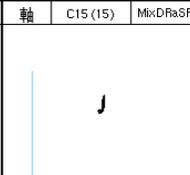
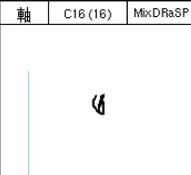
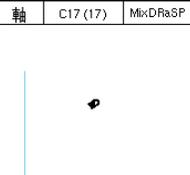
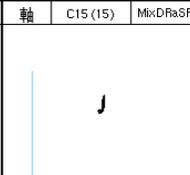
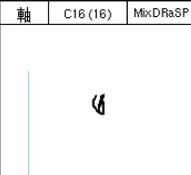
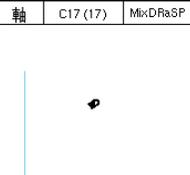
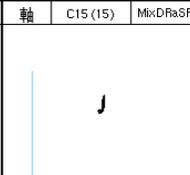
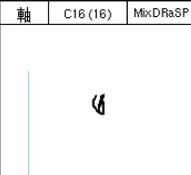
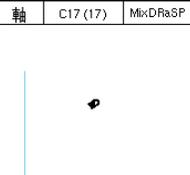
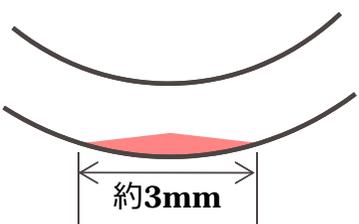
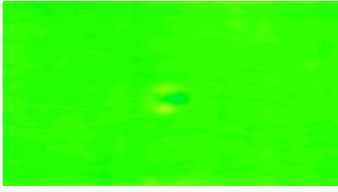
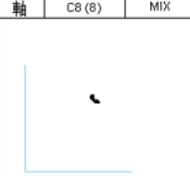
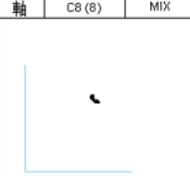
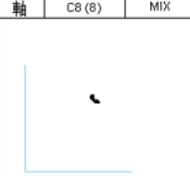
	MIX 色調図	MIX リサージュ	実機信号 整合性																																														
<p><b>実機</b> <b>C X38, Y3</b></p> <p>[減肉痕①] 周長(目視) : 約4mm</p> <p>[減肉痕②] 周長(目視) : 約1mm</p> 	<p>振幅 : 1.69 V 位相 : 114°</p> 	 <table border="1" data-bbox="1312 692 1928 871"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C5 (20)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C6 (19)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C7 (18)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C8 (17)</th> <th>MIX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PF</td> <td>0.23</td> <td>0.23</td> <td>0.15</td> <td>99</td> <td>0.52</td> <td>0.45</td> <td>0.35</td> <td>120</td> <td>1.69</td> <td>1.55</td> <td>0.70</td> <td>114</td> <td>0.26</td> <td>0.21</td> <td>0.23</td> <td>149</td> </tr> </tbody> </table>	軸	C5 (20)	MIX	軸	C6 (19)	MIX	軸	C7 (18)	MIX	軸	C8 (17)	MIX	PF	0.23	0.23	0.15	99	0.52	0.45	0.35	120	1.69	1.55	0.70	114	0.26	0.21	0.23	149	<p>—</p>																	
軸	C5 (20)	MIX	軸	C6 (19)	MIX	軸	C7 (18)	MIX	軸	C8 (17)	MIX																																						
PF	0.23	0.23	0.15	99	0.52	0.45	0.35	120	1.69	1.55	0.70	114	0.26	0.21	0.23	149																																	
<p><b>モックアップ</b></p> <p>[60%減肉] 接触角①20° (三角型) 接触角②120° (三角形) 周長 : 約3mm 軸長 : 約0.7mm</p> <p>[30%減肉] 接触角①45° (三角型) 接触角②120° (三角形) 周長 : 約1mm 軸長 : 約0.4mm</p> 	<p>振幅 : 1.57 V 位相 : 116°</p> 	 <table border="1" data-bbox="1312 1209 1928 1398"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C8 (8)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C7 (7)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C5 (5)</th> <th>MIX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PF</td> <td>0.20</td> <td>0.19</td> <td>0.07</td> <td>78</td> <td>0.57</td> <td>0.55</td> <td>0.19</td> <td>107</td> <td>1.57</td> <td>1.41</td> <td>0.76</td> <td>116</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> <td>0.10</td> <td>82</td> </tr> <tr> <td>Scale</td> <td>30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Scale 30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Scale 30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Scale 30</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸	C8 (8)	MIX	軸	C7 (7)	MIX	軸	C6 (6)	MIX	軸	C5 (5)	MIX	PF	0.20	0.19	0.07	78	0.57	0.55	0.19	107	1.57	1.41	0.76	116	0.20	0.20	0.10	82	Scale	30				Scale 30				Scale 30				Scale 30				<p>○</p>
軸	C8 (8)	MIX	軸	C7 (7)	MIX	軸	C6 (6)	MIX	軸	C5 (5)	MIX																																						
PF	0.20	0.19	0.07	78	0.57	0.55	0.19	107	1.57	1.41	0.76	116	0.20	0.20	0.10	82																																	
Scale	30				Scale 30				Scale 30				Scale 30																																				

# 3. 減肉メカニズム (④-2 ECTモックアップ試験) (2/2) 36

○ B - S Gについても、減肉試験で取得した減肉形状と同等の人工欠陥を T T 6 0 0 伝熱管モックアップに付与し、ECT信号を取得した結果、実機信号と整合することを確認した。

<試験条件>

- ・人工欠陥寸法の幅および長さ：減肉試験で得られた実機相当寸法
- ・人工欠陥寸法の深さ：実機のECT信号

	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性																																									
<p><b>実機</b> <b>B X54, Y4</b> 周長(目視)：約4mm</p> 	<p>振幅：0.19 V 位相：86°</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C15 (15)</th> <th>MixDRaSP</th> <th>軸</th> <th>C16 (16)</th> <th>MixDRaSP</th> <th>軸</th> <th>C17 (17)</th> <th>MixDRaSP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.16</td> <td>0.15</td> <td>PX</td> <td>0.06</td> <td>AN</td> <td>72</td> <td>PP</td> <td>0.19</td> <td>PY</td> <td>0.19</td> <td>PX</td> <td>0.09</td> <td>AN</td> <td>86</td> <td>PP</td> <td>0.09</td> <td>PY</td> <td>0.07</td> <td>PX</td> <td>0.09</td> <td>AN</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table>	軸	C15 (15)	MixDRaSP	軸	C16 (16)	MixDRaSP	軸	C17 (17)	MixDRaSP										PP	0.16	0.15	PX	0.06	AN	72	PP	0.19	PY	0.19	PX	0.09	AN	86	PP	0.09	PY	0.07	PX	0.09	AN	6	—
軸	C15 (15)	MixDRaSP	軸	C16 (16)	MixDRaSP	軸	C17 (17)	MixDRaSP																																				
																																												
PP	0.16	0.15	PX	0.06	AN	72	PP	0.19	PY	0.19	PX	0.09	AN	86	PP	0.09	PY	0.07	PX	0.09	AN	6																						
<p><b>モックアップ</b> 接触角①10° (三角型) 接触角②160° (三角形) 周長：約3mm 軸長：約1mm</p> 	<p>振幅：0.20 V 位相：95°</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C7 (7)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C8 (8)</th> <th>MIX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td colspan="2"></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.19</td> <td>0.19</td> <td>PX</td> <td>0.06</td> <td>AN</td> <td>77</td> <td>PP</td> <td>0.20</td> <td>PY</td> <td>0.20</td> <td>PX</td> <td>0.10</td> <td>AN</td> <td>95</td> <td>PP</td> <td>0.10</td> <td>PY</td> <td>0.06</td> <td>PX</td> <td>0.08</td> <td>AN</td> <td>140</td> </tr> </tbody> </table>	軸	C6 (6)	MIX	軸	C7 (7)	MIX	軸	C8 (8)	MIX										PP	0.19	0.19	PX	0.06	AN	77	PP	0.20	PY	0.20	PX	0.10	AN	95	PP	0.10	PY	0.06	PX	0.08	AN	140	○
軸	C6 (6)	MIX	軸	C7 (7)	MIX	軸	C8 (8)	MIX																																				
																																												
PP	0.19	0.19	PX	0.06	AN	77	PP	0.20	PY	0.20	PX	0.10	AN	95	PP	0.10	PY	0.06	PX	0.08	AN	140																						

### 3. 減肉メカニズム (⑤摩耗体積の評価)

- 流動振動解析により得られたワークレートから算出した1サイクルで発生する摩耗体積と、実機 E C T 結果との整合性が確認された人工欠陥の体積を比較した。
- その結果、解析による摩耗体積と人工欠陥の体積が整合することを確認した。

#### E C T モックアップ試験により実機整合性を確認した減肉形状の体積

対象	確認手段	減肉形状 [mm]			摩耗体積 [mm <sup>3</sup> ]	
		深さ	軸方向長さ	周方向長さ		
C-SG	減肉痕①	目視	—	1以下	約4	—
		ECTモックアップ試験	約0.8	約0.7	約3	約0.5
	減肉痕②	目視	—	1以下	約1	—
		ECTモックアップ試験	約0.4	約0.4	約1	約0.1
合計					約0.6	
B-SG	目視	—	約1	約4	—	
	ECTモックアップ試験	約0.4	約1	約3	約0.3	

#### 流動振動解析により得られたワークレートから算出した摩耗体積

対象	比摩耗量 [m <sup>2</sup> /N]	WR [mW]	運転時間 [hr]	摩耗体積 [mm <sup>3</sup> ]
C-SG	6.6×10 <sup>-15</sup>	約3	約10,000 (①+②)	0.7 (①+②)
			約4,300	0.6
			約5,800	(①0.5+②0.1)
B-SG	6.6×10 <sup>-15</sup>	約3	約10,000	0.7

**以上①～⑤の結果から、C-SGについては回収した金属片又は想定異物、B-SGについては想定異物により、今回認められた摩耗減肉が発生する可能性があることを確認した。**

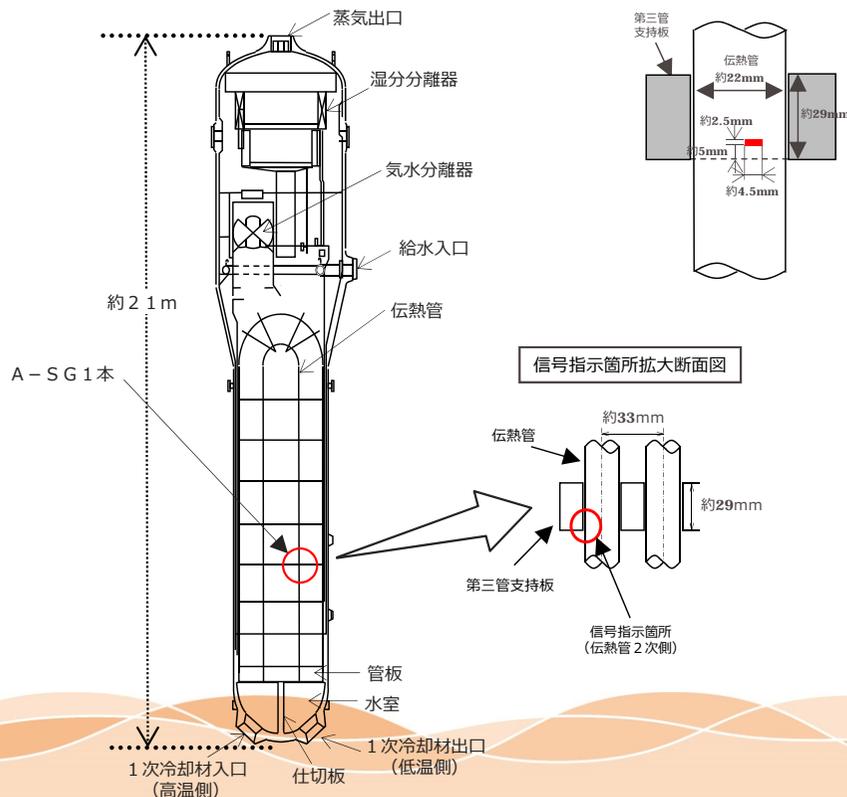
# 3. 減肉メカニズム

## (前回定期検査時のきずと今回確認した金属片の関連性)

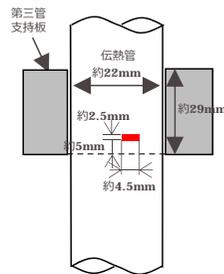
### <事象の概要>

- 高浜3号機前回第23回定期検査では、A-SGの第三管支持板下面近傍において有意な信号指示ではないものの、深さ20%未満の微小減肉が認められた。
- 今回第24回定期検査でA-SGより回収した金属片が、前回定期検査で認められた微小減肉の原因である可能性について調査した結果を、次頁以降に示す。

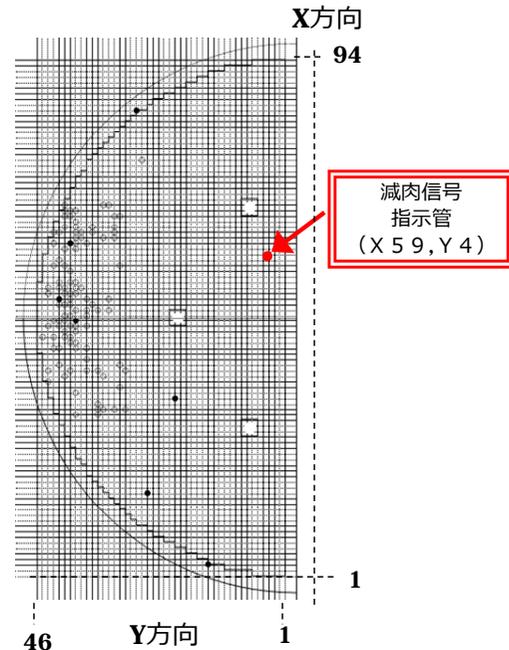
S G 伝熱管信号指示箇所概要図



減肉位置状況

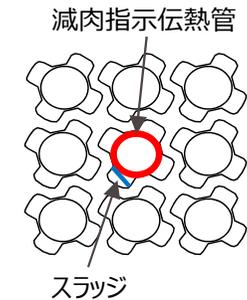


A-蒸気発生器 (低温側) 上部より見た伝熱管位置を示す図

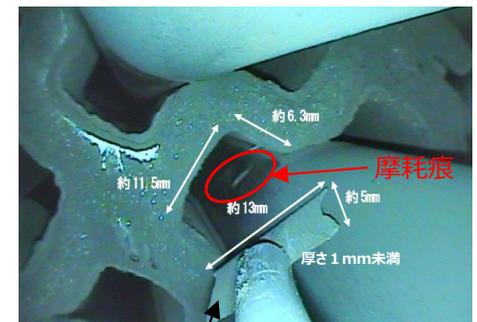


- : 既施栓管 (前回微小減肉指示が認められた位置) (1本)
- : 既施栓管 (高温側管板部の応力腐食割れ) (7本)
- : 既施栓管 (高温側管板部の応力腐食割れ以外) (102本)

信号指示箇所拡大平面図



摩耗痕の写真

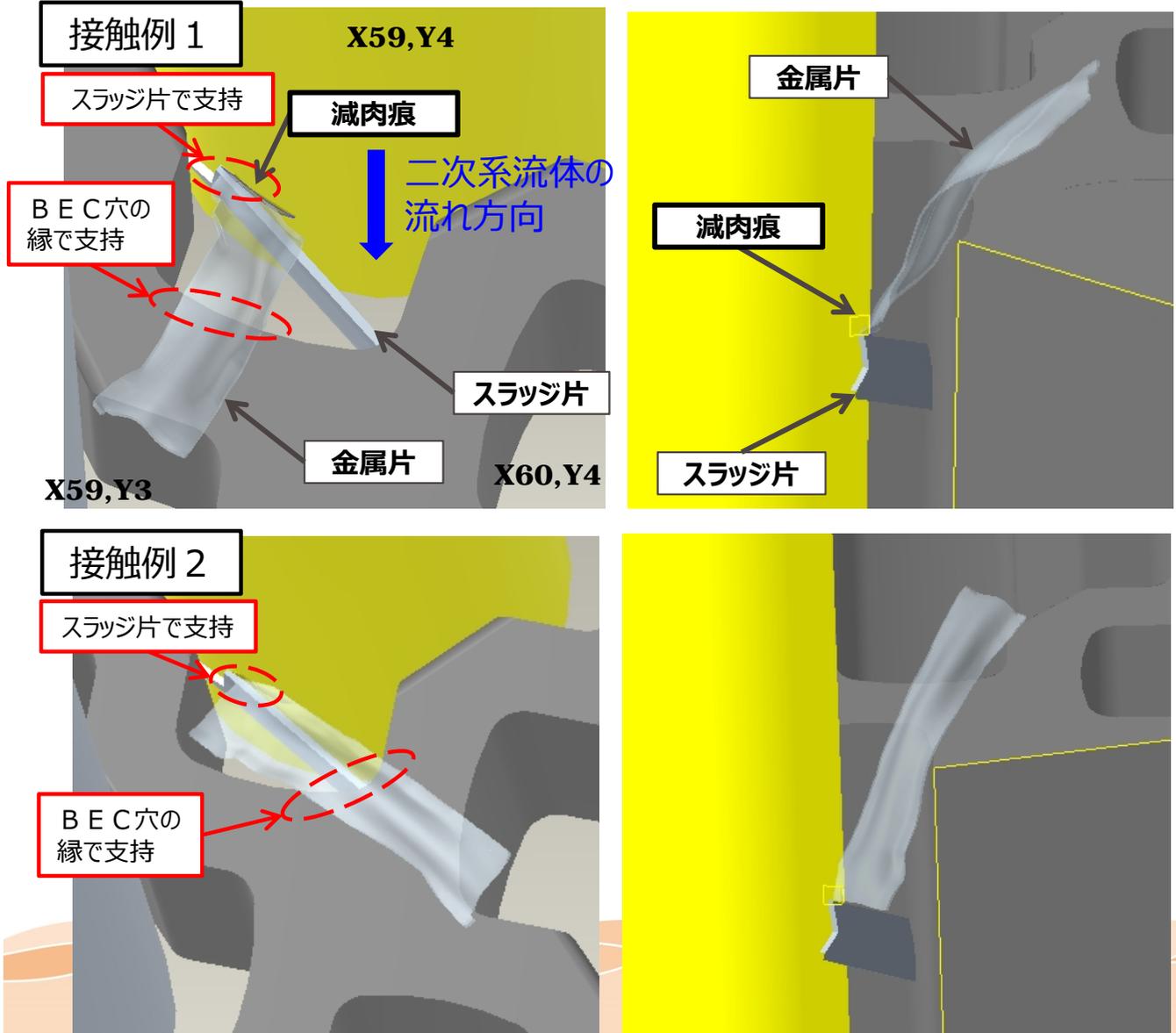


取り外したスラッジ

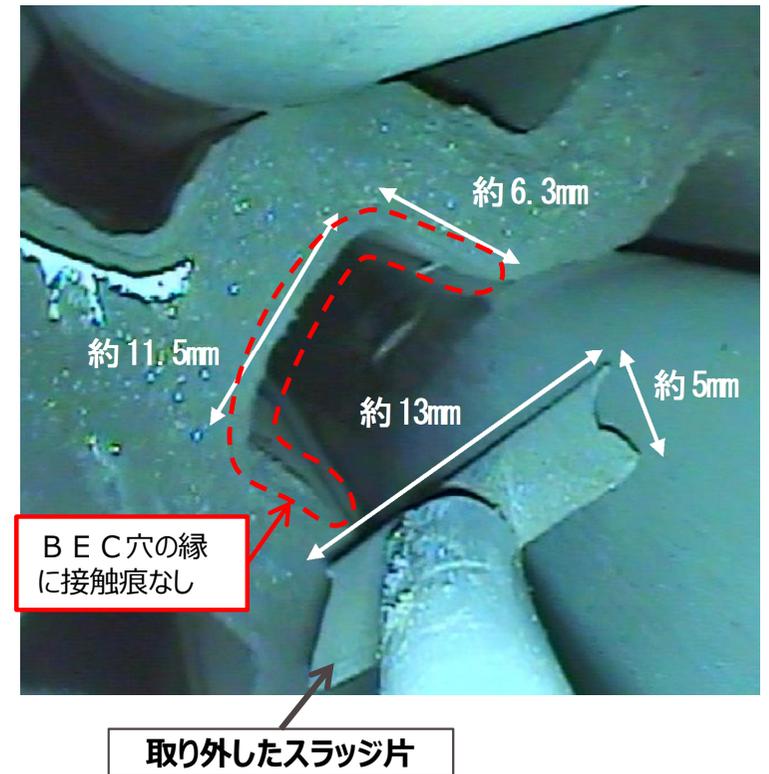
# 3. 減肉メカニズム

## (前回定期検査時のきずと今回確認した金属片の関連性)

- A – S Gの金属片が3号機前回（第23回）定期検査で認められた減肉痕の位置（B E C穴下面よりも約5mm上側）で伝熱管と接触するには、金属片が管支持板B E C穴の縁で支持される姿勢（接触例1もしくは2）をとる必要があるが、当該B E C穴周辺に接触痕は認められていない。
- 従って、当該金属片が3号機前回（第23回）のS G伝熱管損傷事象の原因である可能性は低いと考える。



前回定期検査で減肉痕が認められた伝熱管周辺の管支持板の外観



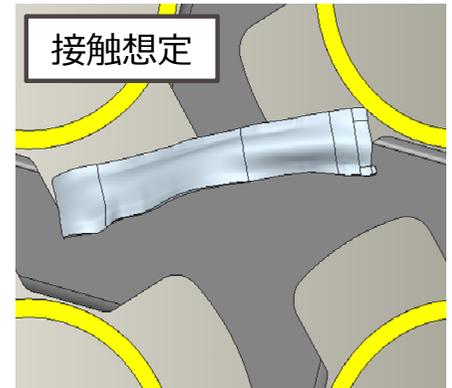
# 3. 減肉メカニズム

## (A-SGで確認した金属片が伝熱管にきずを付けた場合のリスク(影響))

- A-SGでは今回有意な信号指示は検出されなかったが、ここでは、A-SGで発見した金属片が伝熱管に減肉を与えた場合を想定し、その最大減肉深さを評価する。
- また、最大深さの減肉を有する状態での伝熱管の健全性(強度・耐震性)を評価する。

### ① 伝熱管との接触状態の想定

・金属片の形状、重量から、金属片はSG器内を上昇流で浮き上がり、運転中は管支持板下面で保持された状態で伝熱管と接触すると想定した。(右図)



### ② 摩耗形態の選定

・金属片と伝熱管のどちらの振動で有意な摩耗減肉が生じるかを確認  
 ・両者の摩耗の仕事率(ワークレート)を解析により算出した結果、金属片振動ではワークレートは小さく有意な摩耗減肉は発生しないことを確認  
 ・一方、伝熱管振動では金属片振動に比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

### ③ 最大減肉深さの評価

・②の摩耗形態で生じる最大の減肉深さを評価した結果、最大  ※であり、貫通には至らないことを確認した。

※最小板厚を考慮

### ④ 伝熱管健全性の評価

・③の最大減肉深さでの伝熱管の強度・耐震性の評価を実施した結果、いずれも 十分な裕度を有することを確認した。